

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Г. П. БУЯЛОВ, В. А. ДОРОНИН, Н. П. СЕРЕБРЯКОВ

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ  
УПРАВЛЕНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ  
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

Учебное пособие



ЛЕНИНГРАД  
ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ЛЕНИНГРАДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
1989

**Редактор И.Н.Рязанова**

**Рецензенты:** кафедра автоматизации и процессов управления ЛЭТИ (зам. зав. кафедрой канд. техн. наук Н.Н. Кузьмин), канд. техн. наук И.С. Николаев (НПО "Гидролизпром").

**Абон. научной  
литературы**

УДК 676:65.011.56 (075.8)

**Буйлов Г.П., Дорони В.А., Серебряков Н.П.**

**Автоматическое управление технологическими процессами целлюлозно-бумажного производства: Учеб. пособие. - Л.: Издательство Ленинградского университета. 1989. - 262 с.**

ISBN 5-288-00204-5

В учебном пособии впервые в литературе по целлюлозно-бумажному производству изложены основные сведения по измерительной технике и приведены методы и устройства для измерений общепромышленных и специальных физико-химических параметров. Особое внимание уделено автоматическому измерению показателей бумаги и целлюлозы. Рассмотрены основы теории автоматического управления, технические средства автоматизации и системы автоматического управления.

Книга предназначена для студентов и аспирантов технологических вузов, может быть полезна также молодым специалистам целлюлозно-бумажной промышленности.

Библиогр. 47 назв. Табл. 16. Ил. 115.

В 2402010000-001 80-89  
076 (02) - 89

ISBN 5-288-00204-5

© Издательство  
Ленинградского  
университета, 1989

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Автоматизация технологических процессов является одним из главных направлений технического прогресса, повышения производительности труда и создания материально-технической базы для построения коммунистического общества.

Главный путь интенсификации производства и эффективного использования трудовых ресурсов — это переход на принципиально новые системы управления производственными процессами с использованием средств вычислительной техники.

В решениях партии и правительства указывается, что "необходимо сделать крупный шаг в автоматизации производства с переходом к цехам и предприятиям-автоматам, системам автоматизированного управления и проектирования".<sup>\*\*</sup>

В "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986–1990 годы и на период до 2000 года" говорится о необходимости внедрения автоматизированных систем в различные сферы производства, но в первую очередь в проектирование, управление оборудованием и технологическими процессами, о необходимости создания комплексно-автоматизированных производств, которые можно быстро и экономично перестраивать, и постепенного перехода на более высокую ступень автоматизации — к интегрированным производственным комплексам.

Технико-экономические предпосылки создания автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) — это рост масштабов производства, увеличение единичной мощности оборудования, усложнение производственных процессов, использование форсированных технологических режимов, создание оборудования и технологических процессов, работающих в критических условиях, усиление и усложнение связей между отдельными звеньями технологического процесса.

---

<sup>\*\*</sup> Материалы XXVII съезда КПСС. М., 1986. С.141, 142.

Внедрение и эксплуатация автоматизированных систем управления технологическими процессами в целлюлозно-бумажной промышленности требует знания принципов построения систем автоматизации и средств управляющей вычислительной техники, обеспечивающих их функционирование.

Данное учебное пособие написано на основе материалов лекций, читаемых авторами по курсу "Автоматика и автоматизация производственных процессов" для студентов специальностей 0558, 0836, 0904 и 1720 всех форм обучения в Ленинградском технологическом институте целлюлозно-бумажной промышленности.

В учебном пособии рассмотрены основы теории линейных автоматических систем управления (САУ), понятия о нелинейных, дискретных, оптимальных и адаптивных САУ, методы и приборы для автоматического измерения общепромышленных и специальных параметров в технологических процессах целлюлозно-бумажного производства и очистки сточных вод и газовых выбросов. Изложены методы проектирования систем автоматизации технологических процессов и представлены функциональные схемы систем автоматизации основных технологических процессов и оборудования целлюлозно-бумажной промышленности, очистки сточных вод и газовых выбросов; принципы построения и функционирования АСУТП.

## Глава I

### АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

#### 1.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ

Управление каким-либо объектом — это воздействие на него с целью обеспечения требуемого хода процессов в объекте или требуемого изменения его состояния. Основой управления является получение и обработка информации о состоянии объекта и внешних условиях его работы для определения воздействий, которые необходимо приложить к объекту, чтобы обеспечить достижение цели управления.

Система, в которой осуществляется процесс управления, называется системой управления. Любую систему управления можно представить как совокупность объекта управления и управляющего органа.

Объект управления может принадлежать как к неживой природе, в частности быть техническим устройством, так и к живой природе. В свою очередь, само управление также может осуществляться как человеком, так и техническим устройством. Общая теория управления является одним из разделов кибернетики. Управление, осуществляемое без участия человека, называется автоматическим управлением.

Состояние объекта характеризуется выходной (регулируемой) величиной. В общем случае выходных величин несколько, и тогда состояние объекта характеризуется вектором, координатами которого являются отдельные выходные величины. На вход объекта поступает управляющее воздействие от управляющего устройства; возмущающее воздействие, связанное с изменением состояния объекта и препятствующее управлению; задающее воздействие, содержащее информацию о цели управления. Управляющее воздействие вырабатывается с таким расчетом, чтобы регулируемая величина изменялась по требуемому закону с определенной точностью независимо от действия на объект возмущающих воздействий. Системы управления, обеспечивающие равенство регулируемой величины и

задающего воздействия, называются системами регулирования.

Автоматизированные системы управления (АСУ) — это человеко-машинные системы, в которых часть функций выполняется человеком, а другая часть — автоматическими устройствами. АСУ базируются на экономико-математических методах и вычислительной технике.

Характеристика производства как объекта управления. На производственном предприятии осуществляется сложный процесс превращения сырья и материалов в готовую продукцию. Осуществление этого процесса требует выполнения ряда разнообразных функций, совокупность которых принято называть производственно-хозяйственной деятельностью предприятия. Основными производственно-хозяйственными функциями являются: производство продукции; выполнение ремонтных работ; техническая подготовка производства; материально-техническое обеспечение; организационно-трудовая подготовка производства; финансово-бухгалтерская деятельность; реализация готовой продукции.

Центральным звеном предприятия является основное производство, где осуществляется процесс получения готовой продукции. Производственный процесс представляет собой совокупность технологических процессов, которые, в свою очередь, состоят из технологических операций.

Структура и тип производственного предприятия определяется типом основных технологических процессов. Различают непрерывные, дискретные и дискретно-непрерывные производства. В целлюлозно-бумажной промышленности большинство технологических процессов являются непрерывными.

Объединение всех технологических процессов производства готовых продуктов называется технологией производства, а связь между технологическими процессами и операциями — технологической схемой. Совокупность параметров всех технологических процессов называется технологическим режимом. Целью технологического процесса является получение готового продукта с заданными свойствами путем управления технологическим режимом.

**Задачи управления производством.** Производственное предприятие как система управления состоит из управляющей и управляемой подсистем, связанных между собой каналами передачи информации.

Цель управления задается предприятию вышестоящей организацией в виде основных плановых и технико-экономических показателей. Для осуществления производственных функций предприятию выделяются трудовые, финансовые и материальные ресурсы. Величина каждого вида ресурсов ограничена. В рамках этих ограничений предприятие может маневрировать ресурсами, распределяя их между подразделениями с целью достижения наилучших технико-экономических показателей.

Сложные системы управления строятся, как правило, по иерархическому принципу. В зависимости от структуры предприятия в производственной системе можно выделить два уровня управления. Нижний уровень состоит из систем управления технологическими процессами, верхний — из системы управления предприятием.

Задачу управления технологическим процессом можно сформулировать следующим образом: найти такое состояние технологического процесса (технологический режим) и такое управляющее воздействие, которые удовлетворят цели управления при заданных ограничениях.

Система управления предприятием относится к организационно-экономическим системам управления. Цель управления заключается в организации совместного функционирования цехов для выпуска готовой продукции в заданном количестве при заданных технико-экономических показателях. Главное отличие организационно-экономических систем от систем управления технологическими процессами заключается в характере объекта управления. Если в системах управления технологическими процессами объектом управления является отдельный технологический процесс, то в организационно-экономических системах это коллективы людей, взаимодействующие с технологическим оборудованием и осуществляющие технологическую подготовку производства. Основой функционирования организационно-экономических систем являются экономические и социальные законы.

## 1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ САУ

Техническое устройство, с помощью которого осуществляется автоматическое управление объектом, называется управляющим устройством. Совокупность объекта управления и управляющего устройства образует автоматическую систему управления. Функциональная схема САУ приведена на рис.1.

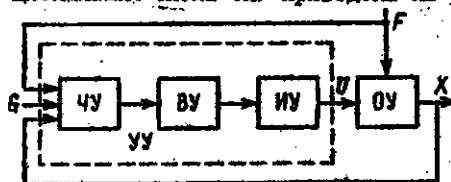


Рис.1. Функциональная схема САУ.

ОУ — объект управления, УУ — управляющее устройство.

От управляющего устройства на вход объекта поступает управляющее воздействие  $U$ .

Помимо управляющего воздействия, к объекту приложено также возмущающее воздействие (помеха)  $F$ . На вход управляющего устройства подается задающее воздействие  $G$ , содержащее информацию о цели управления.

Управляющее устройство (УУ) состоит из чувствительного устройства (ЧУ), вычислительного устройства (ВУ) и исполнительного устройства (ИУ).

Чувствительные устройства служат для измерения переменных  $X$ ,  $G$ ,  $F$ .

Вычислительное устройство реализует алгоритмы работы управляющего устройства, соответствующим образом перерабатывая входную информацию. Исполнительные устройства предназначены для непосредственного управления объектом, т.е. изменения его состояния.

В общем случае на управляющее устройство поступают три вида информации: о величине  $X$ , определяющей состояние объекта; о величине  $G$ , задающей цель управления; о возмущающих  $F$ , нарушающих режим работы объекта. Однако возможны САУ

Состояние объекта характеризуется выходной величиной  $X$ . В общем случае выходных величин несколько, и тогда состояние объекта характеризуется вектором  $X$ , координатами которого являются отдельные выходные величины. От управ-



в которых используется лишь часть информации. При этом в зависимости от видов используемой информации различают два основных типа САУ – разомкнутые и замкнутые.

В разомкнутых САУ выходная величина объекта  $X$  не измеряется.

Разомкнутыми такие системы называются потому, что в них отсутствует обратная связь между выходом объекта и входом управляющего устройства.

Возможны разомкнутые САУ, в которых измеряется либо только задающее воздействие  $G$ , либо одно возмущение  $F$ , либо оба одновременно. В первом случае управление осуществляется по задающему воздействию. Точность соответствия между  $X$  и  $G$  при этом целиком определяется постоянством параметров системы, поэтому такие системы пригодны при стабильных параметрах системы и невысоких требованиях к точности. Во втором случае САУ является системой управления по возмущению, или системой автоматической компенсации. Они применяются, когда задача управления сводится к стабилизации выходной величины  $X$ . В третьем случае управление осуществляется по задающему и возмущающему воздействиям.

Разомкнутые САУ имеют невысокую точность управления, во-первых, вследствие невозможности охватить компенсацией все возмущения, действующие на систему, и, во-вторых, из-за изменения во времени параметров системы.

В замкнутых САУ на вход управляющего устройства подаются задающее воздействие  $G$  и выходная величина объекта  $X$ . В такой САУ управляющее устройство стремится ликвидировать все отклонения  $X$  от задания  $G$  независимо от причины их возникновения. Замкнутые САУ называются системами с обратной связью, или системами управления по отклонению. Эти САУ обеспечивают высокую точность управления.

Комбинированные САУ представляют собой объединение в одну систему замкнутой системы управления по отклонению и разомкнутой по внешнему воздействию.

Частным видом САУ являются автоматические системы регулирования (АСР), обеспечивающие равенство  $X = G$ . В зависимости от характера задающего воздействия АСР делятся на три вида: системы стабилизации, системы программного регулирования и следящие системы.

В системах стабилизации задающее воздействие постоянно, в системах программного регулирования оно изменяется по известному закону, в следующих системах оно тоже изменяется, но закон изменения заранее не известен. Управляющее устройство в АСУ называется регулятором, а выходная величина — регулируемой величиной.

По виду характеристик САУ делятся на линейные и нелинейные. Линейные системы описываются линейными уравнениями, а нелинейные — нелинейными.

Для линейных систем справедлив принцип суперпозиции, согласно которому реакция системы на любую комбинацию внешних воздействий равна сумме реакций на каждое из этих воздействий порознь.

Для упрощения исследования нелинейных систем производится их линеаризация, т.е. приближенное описание их линейными уравнениями.

САУ бывают стационарными и нестационарными. Стационарной называется система, все параметры которой не изменяются во времени. Нестационарная система — это система с переменными параметрами. Коэффициенты математической модели нестационарной системы являются функциями времени.

В зависимости от характера действия составляющих систему звеньев САУ делятся на непрерывные и дискретные. Непрерывная система состоит из звеньев непрерывного действия, т.е. звеньев, выходная величина которых изменяется плавно при плавном изменении входной величины. Дискретная САУ содержит хотя бы одно звено дискретного действия (раздельное, когда скачки входной величины происходят при прохождении входной величиной определенных пороговых значений, или импульсное, когда скачки происходят через определенный интервал времени).

Оптимальные САУ — это системы, в которых обеспечено оптимальное значение какого-либо показателя качества работы системы, называемого критерием оптимальности.

Адаптивные, или самоприспосабливающиеся, системы обладают способностью приспосабливаться к изменению внешних условий работы.

### 1.3. ХАРАКТЕРИСТИКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ САУ

Теория автоматического управления занимается решением двух задач – анализом системы и ее синтезом. В первом случае дается система и требуется определить ее свойства. Во втором случае, наоборот, задаются свойства, которыми должна обладать система, и необходимо создать систему, удовлетворяющую этим требованиям.

Исследование САУ в обоих случаях включает математическое описание системы и исследование поведения системы в статическом и динамическом режимах.

1.3.1. Математическое описание элементов автоматических систем управления. Математическое моделирование – один из методов технической кибернетики – науки, изучающей системы, способные воспринимать, хранить и перерабатывать информацию. Методы математического моделирования позволяют описывать одинаковыми формулами различные по своей природе процессы. Эффективность использования математических моделей определяется тем, насколько правильно они отражают количественные и качественные характеристики моделируемых объектов, т.е. адекватностью моделей.

Математическое моделирование дополняет физическое моделирование возможностью количественной априорной оценки исследуемых явлений.

Различают статические и динамические математические модели. Статической моделью называется зависимость выходного параметра от входного в установившемся режиме. Динамические модели изображают закон изменения выходного параметра во времени при изменении входного воздействия. Динамические модели задаются в виде дифференциальных уравнений.

Если переменные объекта изменяются только во времени, то модели, описывающие свойства таких объектов, называются моделями с сосредоточенными параметрами. Модели объектов, переменные которых изменяются как во времени, так и по координатам аппарата, называются моделями с распределенными параметрами. Динамические характеристики объектов с сосредоточенными параметрами описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, а с распределенными – дифференциальными уравнениями в частных производных.

Различают три метода математического моделирования: аналитический, экспериментальный и экспериментально-аналитический. Аналитический метод основан на количественной и качественной оценке процессов, происходящих в моделируемом объекте. Аналитические модели базируются на общих физических законах и механизмах процессов, происходящих в объекте. При составлении аналитических моделей не требуется проведение экспериментов на объекте. Это свойство позволяет использовать аналитический метод моделирования еще на стадии проектирования.

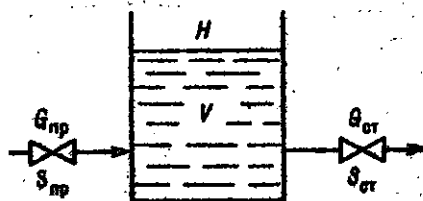


Рис. 2. Расчетная схема емкости.

Экспериментальные методы моделирования делятся на активные и пассивные. При активных методах на вход исследуемого объекта подаются сигналы определенного вида и фиксируются изменения выходных переменных. Полученные экспериментальные

данные аппроксимируются аналитическими математическими моделями. При пассивных методах используются статистические приемы обработки экспериментальных данных, полученных в процессе нормальной эксплуатации исследуемого объекта.

При использовании экспериментально-аналитического метода вначале составляется аналитическая модель объекта, а в дальнейшем проводятся эксперименты на конкретном объекте с целью определения коэффициентов уравнений.

**Аналитические модели.** В качестве примера аналитического моделирования выведем уравнение емкости как объекта регулирования уровня жидкости. Расчетная схема емкости приведена на рис. 2. Составим уравнение материального баланса. Количество жидкости, находящейся в емкости, равно разности расходов со стороны притока и стока:

$$G = (G_{\text{пр}} - G_{\text{от}}) t, \quad (1.1)$$

где  $G$  - количество жидкости в емкости,  $\text{м}^3$ ;  $G_{\text{пр}}$ ,  $G_{\text{от}}$  - расходы жидкости на притоке и стоке соответственно,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $t$  - время, с.

Продифференцировав по  $t$ , получим

$$\frac{dG}{dt} = G_{\text{пр}} - G_{\text{ст}}. \quad (1.2)$$

Запишем уравнение (1.2) в приращениях:

$$\frac{d\Delta G}{dt} = \Delta G_{\text{пр}} - \Delta G_{\text{ст}}. \quad (1.3)$$

Уравнение (1.3) — дифференциальное уравнение материального баланса. Выразим члены этого уравнения через технологические параметры и конструктивные размеры емкости.

Количество жидкости в баке равно его объему, т.е.

$$G = V = HF, \quad (1.4)$$

где  $V$  — объем части емкости, занятой жидкостью,  $\text{м}^3$ ;  $H$  — уровень жидкости в емкости,  $\text{м}$ ;  $F$  — сечение емкости,  $\text{м}^2$ .

Поскольку  $F = \text{const}$ , то уравнение в приращениях (1.4) можно записать в виде

$$\Delta G = F \Delta H. \quad (1.5)$$

Расход жидкости на притоке зависит от степени открытия клапана и от перепада давления на нем. Полагая давление перед клапаном постоянным, можно записать

$$G_{\text{пр}} = G_{\text{пр}}(S_{\text{пр}}, H), \quad (1.6)$$

где  $S_{\text{пр}}$  — степень открытия клапана на притоке.

Разлагая зависимость (1.6) в ряд Тейлора и ограничиваясь линейным приближением, т.е. отбрасывая члены высшего порядка малости, получим

$$\Delta G_{\text{пр}} = K_1 \Delta S_{\text{пр}} - K_2 \Delta H, \quad (1.7)$$

где коэффициенты пропорциональности определяются из статистических характеристик объекта в соответствии с выражениями

$$K_1 = \left| \frac{\partial G_{\text{пр}}}{\partial S_{\text{пр}}} \right|, \quad K_2 = \left| \frac{\partial G_{\text{пр}}}{\partial H} \right|. \quad (1.8)$$

Знак минус в уравнении (1.7) означает, что с увеличением  $H$  расход  $Q_{пр}$  уменьшается.

Рассуждая аналогично, для изменения расхода жидкости на стоке можно записать:

$$Q_{ст} = Q_{от} (S_{ст} \cdot H), \quad (1.9)$$

где  $S_{от}$  — степень открытия клапана на стоке. При этом полагаем, что давление после клапана на линии стока постоянно:

$$Q_{ст} = K_3 \Delta S_{ст} + K_4 \Delta H, \quad (1.10)$$

где 
$$K_3 = \left| \frac{\partial Q_{ст}}{\partial S_{ст}} \right|, \quad K_4 = \left| \frac{\partial Q_{ст}}{\partial H} \right|, \quad (1.11)$$

$K_3, K_4$  — частные производные  $Q_{от}$  по соответствующим параметрам, определяются из статических характеристик.

Зависимость расходов на притоке и стоке от уровня в соответствии с уравнениями (1.6) и (1.9) указывает на то, что данный объект обладает свойством самовыравнивания на притоке и стоке. Самовыравнивание — свойство объекта самостоятельно приходить к новому установившемуся состоянию после нанесения возмущения.

Подставляя значения  $\Delta Q, \Delta Q_{пр}, \Delta Q_{ст}$  из уравнений (1.5), (1.7), (1.10) в уравнение (1.3), получим

$$F \frac{d\Delta H}{dt} = K_1 \Delta S_{пр} - K_2 \Delta H - K_3 \Delta S_{ст} - K_4 \Delta H. \quad (1.12)$$

После приведения подобных, переноса  $\Delta H$  в левую часть и деления всех членов на коэффициент при  $\Delta H$  получим

$$\frac{F}{K_2 + K_4} \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = \frac{K_1}{K_2 + K_4} \Delta S_{пр} - \frac{K_3}{K_2 + K_4} \Delta S_{ст}, \quad (1.13)$$

или 
$$T \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = K_y \Delta S_{пр} - K_o \Delta S_{ст}, \quad (1.14)$$

где  $T = \frac{F}{K_2 + K_4}$  — постоянная времени емкости, с;  $K_y = \frac{K_1}{K_2 + K_4}, K_o = \frac{K_3}{K_2 + K_4}$  — коэффициенты усиления емкости по каналам управления и возмущения соответственно.

Уравнение (1.14) – дифференциальное уравнение емкости в приращениях.

Предположим для определенности, что управление уровнем осуществляется с помощью клапана на стоке. В этом случае  $K_y$  – коэффициент усиления стока относительно управляющего воздействия;  $K_v$  – то же относительно возмущающего воздействия.

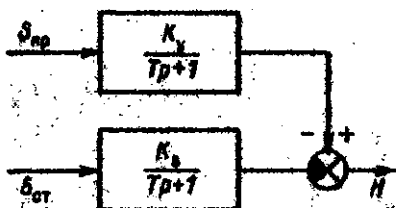


Рис. 3. Структурная схема емкости.

Конечной целью математического описания является построение структурной схемы объекта. Для этого перейдем к символической форме записи уравнения (1.14). Положим  $d/dt = p$  и для упрощения отбросим знак  $\Delta$ :

$$(Tp + 1)H = K_y \Delta_{пр} - K_v \Delta_{ст}, \quad (1.15)$$

откуда

$$H = \frac{K_y}{Tp + 1} \Delta_{пр} - \frac{K_v}{Tp + 1} \Delta_{ст}. \quad (1.16)$$

В соответствии с выражением (1.16) строим структурную схему емкости (рис. 3).

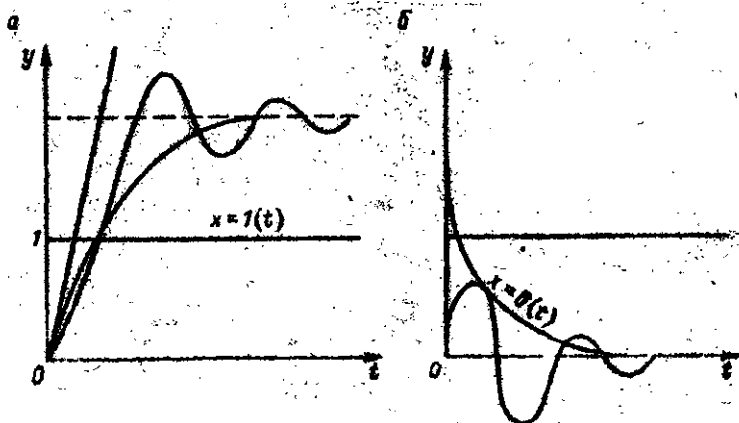


Рис. 4. Переходные характеристики.

$a$  – переходная;  $b$  – импульсная переходная.

**Экспериментальные модели.** Определение характеристик объектов по данным экспериментальных исследований называется идентификацией. Экспериментальный метод определения динамических характеристик объекта заключается в снятии переходных функций и аппроксимации их решением дифференциального уравнения.

**Переходные характеристики** — одна из форм задания динамических свойств САУ. Эти характеристики могут быть сняты экспериментально или построены по уравнению звена системы управления.

Переходная, или временная, характеристика звена представляет собой реакцию на выходе звена, вызванную подачей на его вход единичного ступенчатого воздействия. На рис. 4, а приведены три переходные характеристики, соответствующие различным типам звеньев. Переходная характеристика обозначается  $h(t)$ . Единичное ступенчатое воздействие обозначается  $1(t)$  и может быть описано

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (1.17)$$

Наряду с переходной характеристикой применяется импульсная переходная (временная) характеристика, или весовая функция. Эта характеристика представляет собой реакцию звена на единичный импульс. Единичный импульс, или дельта-функция, — это импульс, площадь которого равна единице, длительность — нулю и высота — бесконечности. На рис. 4, б изображены типичные формы импульсных переходных характеристик. Импульсная переходная характеристика обозначается  $w(t)$ , единичный импульс —  $\delta(t)$ . Математически дельта-функцию можно записать так:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0, \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases} \quad (1.18)$$

при этом согласно определению:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1. \quad (1.19)$$



Между переходной и весовой функциями существует однозначная зависимость:

$$\omega(t) = h'(t), \quad (1.20)$$

$$h(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau. \quad (1.21)$$

Зная переходную или весовую функцию, можно определить реакцию звена на произвольное входное воздействие при нулевых начальных условиях с помощью интеграла Дюамеля:

$$y(t) = \int_0^t \omega(t - \tau) x(\tau) d\tau, \quad (1.22)$$

где  $\tau$  — ширина (длительность) импульсов.

Аппроксимация переходных функций решением дифференциального уравнения может производиться аналитическими методами и графически.

Рассматривая емкость только по каналу управления, из уравнения (1.14) получим

$$T \frac{dH}{dt} + H = K_y S_{\text{пр}}. \quad (1.23)$$

Для получения переходной функции проинтегрируем уравнение (1.23):

$$H = K_y S_{\text{пр}} (1 - e^{-t/T}). \quad (1.24)$$

Таким образом, переходная функция представляет собой экспоненту (рис. 5).

Новое установившееся значение уровня может быть получено из уравнения (1.24) при  $t \rightarrow \infty$ :

$$\begin{aligned} H_{\infty} &= K_y S_{\text{пр}} (1 - e^{-\infty}) = \\ &= K_y S_{\text{пр}}. \end{aligned} \quad (1.25)$$

Постоянная времени  $T$  определяется как проекция на ось времени отрезка касательной, заключенного между точкой начала и линией установившегося

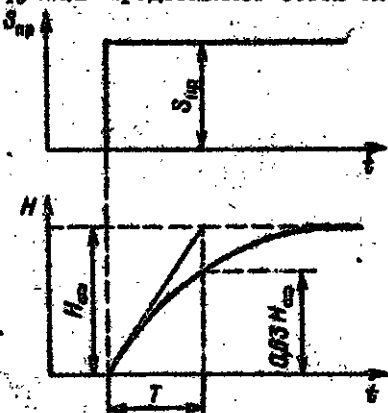


Рис. 5. Переходная характеристика емкосты.

значения регулируемой величины. Эта величина постоянна для данной экспоненты. Если в уравнении экспоненты положить  $t = T$ , то получим

$$H = K_y S_{пр} (1 - e^{-1}) = 0,63 K_y S_{пр}. \quad (1.26)$$

Следовательно, за время  $T$  регулируемая величина достигает 63% своего установившегося значения. Коэффициент усиления объекта определяется по формуле

$$K_y = H_{\infty} / S_{пр}. \quad (1.27)$$

**1.3.2. Частотные характеристики.** Комплексное число. Комплексным числом называется выражение вида

$$Z = \alpha + j\beta, \quad (1.28)$$

где  $\alpha$  — вещественная часть комплексного числа;  $\beta$  — мнимая часть комплексного числа;  $j = \sqrt{-1}$ .

Если  $\alpha = 0$ , то комплексное число называется чисто мнимым. При  $\beta = 0$  комплексное число становится вещественным. Комплексное число изображается на комплексной плоскости точкой с координатами  $(\alpha, \beta)$  или вектором, проведенным из начала координат в эту точку. Длина вектора называется абсолютной величиной комплексного числа или модулем:

$$M = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}. \quad (1.29)$$

Угол между положительным направлением вещественной оси и вектором называется его аргументом или фазой:

$$\varphi = \arctg \frac{\beta}{\alpha}. \quad (1.30)$$

Абсцисса и ордината комплексного числа могут быть выражены так:

$$\alpha = M \cos \varphi, \quad (1.31)$$

$$\beta = M \sin \varphi. \quad (1.32)$$

Отсюда

$$\alpha + j\beta = M(\cos \varphi + j \sin \varphi). \quad (1.33)$$

По формуле Эйлера

$$\cos \varphi + j \sin \varphi = e^{j\varphi}, \quad (1.34)$$

поэтому

$$\alpha + j\beta = Me^{j\varphi}, \quad (1.35)$$

или

$$\alpha + j\beta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{j \arctg \frac{\beta}{\alpha}}. \quad (1.36)$$

**Операционное исчисление.** Операционное исчисление служит для упрощения математических операций при расчетах, в частности при дифференцировании и интегрировании.

Решение уравнений операционным методом состоит из трех этапов:

- 1) приведение исходных уравнений к операторной форме;
- 2) решение операторных уравнений;
- 3) определение решений исходных уравнений по решениям операторных уравнений.

Чтобы получить операторные уравнения, функции, входящие в уравнение, подвергаются прямому преобразованию Лапласа в соответствии с выражением

$$F(p) = L[f(t)] = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt. \quad (1.37)$$

Функция  $f(t)$  вещественного переменного  $t$ , подвергаясь прямому преобразованию Лапласа, называется оригиналом, а функция  $F(p)$  комплексного переменного  $p$ , получаемая в результате преобразования  $p$ , — изображением.

Основные свойства преобразования Лапласа:

а) линейность: если

$$f(t) \rightarrow F(p), \quad (1.38)$$

то

$$aF(t) \rightarrow aF(p);$$

б) интегрирование оригинала

$$\int_0^t f(\tau) d\tau \rightarrow \frac{1}{p} F(p), \quad (1.39)$$

т.е. интегрированию оригинала соответствует деление изображения на оператор  $p$ ;

в) дифференцирование оригинала:

$$\frac{d f(t)}{d t} \rightarrow p F(p), \quad (1.40)$$

т.е. дифференцирование оригинала соответствует умножению изображения на оператор  $p$ ;

г) дифференцирование  $n$ -кратное определяется выражением

$$\frac{d^n f(t)}{d t^n} \rightarrow p^n F(p); \quad (1.41)$$

д) запаздывание в области вещественного переменного:

$$f(t-\tau) \rightarrow e^{-p\tau} F(p); \quad (1.42)$$

е) сдвигу в области вещественного переменного на  $\tau$  соответствует умножение изображения на  $e^{-p\tau}$ .

На втором этапе решения задачи операционным методом определяется решение операторных уравнений, являющееся изображением решения поставленной задачи. Чтобы отнестись к решению исходных уравнений, необходимо совершить переход от изображения решения к его оригиналу. Этот переход осуществляется с помощью обратного преобразования Лапласа:

$$f(t) = L^{-1}[F(p)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} F(p) e^{pt} dp. \quad (1.43)$$

При вычислениях на основе преобразований Лапласа часто используют специальные таблицы.

**Передачная функция.** Передаточной функцией  $W(p)$  динамической системы называется отношение изображений Лапласа выходной и входной величин при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{L[y(t)]}{L[x(t)]}. \quad (1.44)$$

Передаточная функция является одним из способов задания динамических характеристик САУ. Она однозначно связана с дифференциальным уравнением системы

$$a_n \frac{d^n y(t)}{d t^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{d t^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d y(t)}{d t} + a_0 y(t) =$$

$$= b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t). \quad (1.45)$$

Дифференциальному уравнению (1.45) соответствует передаточная функция вида

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} \quad (1.46)$$

при  $n \geq m$ .

Например, дифференциальному уравнению емкости (1.23) соответствует передаточная функция

$$W(p) = \frac{K_y}{Tp + 1}. \quad (1.47)$$

Передаточная функция связана с весовой функцией соотношением

$$W(p) = \mathcal{L}[\omega(t)], \quad (1.48)$$

т.е. передаточная функция есть изображение весовой функции.

Частотные характеристики описывают установившиеся колебания на выходе звена, вызванные гармоническим воздействием на входе.

Если на вход звена подать гармоническое воздействие вида

$$x = x_{\max} \sin \omega t,$$

то по окончании переходного процесса на выходе звена будут существовать колебания вида

$$y = y_{\max} \sin(\omega t + \varphi).$$

т.е. отличающиеся от входных по амплитуде и фазе.

Амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) называется зависимость отношения амплитуды гармонических колебаний на выходе к амплитуде колебаний на входе звена от частоты, т.е. зависимость  $A(\omega)$ .

Фазовой частотной характеристикой (ФЧХ) называется зависимость разности фаз между выходными и входными гармоническими колебаниями от частоты этих колебаний, т.е. зависимость вида  $\varphi(\omega)$ .

АЧХ и ФЧХ можно объединить в одну характеристику — амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ):

$$W(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}. \quad (1.49)$$

Из уравнения (1.49) видно, что модуль АФЧХ представляет собой АЧХ, а аргумент — ФЧХ.

Аналитические выражения для частотных характеристик могут быть получены по передаточной функции. Если в уравнении передаточной функции (1.46) положить  $p = j\omega$ , то получим АФЧХ:

$$W(j\omega) = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + b_1 j\omega + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 j\omega + a_0}. \quad (1.50)$$

После освобождения от мнимости в знаменателе уравнение (1.50) можно записать в виде

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega). \quad (1.51)$$

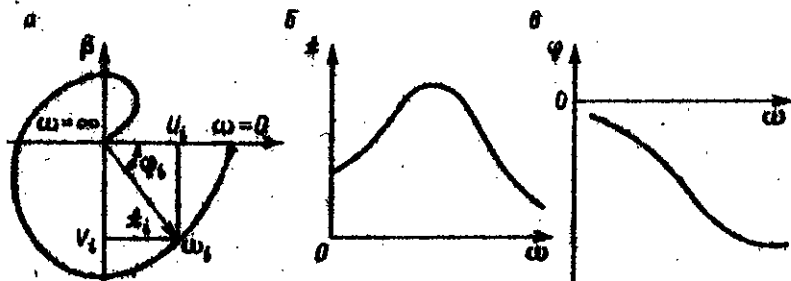


Рис. 6. Частотные характеристики.

а — АФЧХ; б — АЧХ; в — ФЧХ.

Функция  $U(\omega)$  называется действительной (вещественной) частотной характеристикой, а  $V(\omega)$  — мнимой частотной характеристикой. Между частотными характеристиками существует связь:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}, \quad (1.52)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}, \quad (1.53)$$

$$U(\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega), \quad V(\omega) = A(\omega) \sin \varphi(\omega), \quad (1.54)$$

$$H(j\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} e^{j \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}}. \quad (1.55)$$

Примерный вид частотных характеристик изображен на рис. 6.

Если прологарифмировать выражение (1.49), то получим

$$\ln H(j\omega) = \ln [A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}] = \ln A(\omega) + j\varphi(\omega). \quad (1.56)$$

Зависимость  $L = 20 \lg A$  от  $\lg \omega$  называется логарифмической амплитудной характеристикой (ЛАХ), а зависимость  $\varphi$  от  $\lg \omega$  - логарифмической фазовой характеристикой (ЛФХ).

В качестве единицы измерения  $L$  используется бел - это десятичный логарифм усиления мощности сигнала, т.е. 1 бел соответствует усилению мощности в 10 раз, 2 бела - в 100 раз, 3 бела - в 1000 раз и так далее.

**1.3.3. Типовые звенья САУ.** При исследовании САУ ее разбивают на простые звенья.

В результате этого математическое описание каждого звена может быть

составлено без учета связей его с другими звеньями,

а описание всей САУ может быть получено как совокупность уравнений отдельных звеньев.

**Усилительное звено.** Уравнение усилительного звена имеет вид

$$y = Kx. \quad (1.57)$$

Передаточная функция в этом случае будет

$$H(p) = K; \quad (1.58)$$



Рис. 7. Рычаг.

амплитудно-фазовая характеристика:

$$W(j\omega) = K. \quad (1.59)$$

Пример усилительного звена приведен на рис. 7. Уравнение рычага имеет вид

$$y = \frac{l_2}{l_1} x.$$

Апериодическое звено. Уравнение этого звена имеет вид

$$T \frac{dy}{dt} + y = Kx. \quad (1.60)$$

Передачная функция:

$$W(p) = \frac{K}{Tp+1}; \quad (1.61)$$

амплитудно-фазовая характеристика:

$$W(j\omega) = \frac{K}{Tj\omega+1} = \frac{K}{\sqrt{1+T^2\omega^2}} e^{-j \arctg T\omega} \quad (1.62)$$

АФЧХ представляет собой полуокружность с радиусом  $K/2$  и центром в точке  $(K/2, j=0)$  на действительной оси (рис. 8).

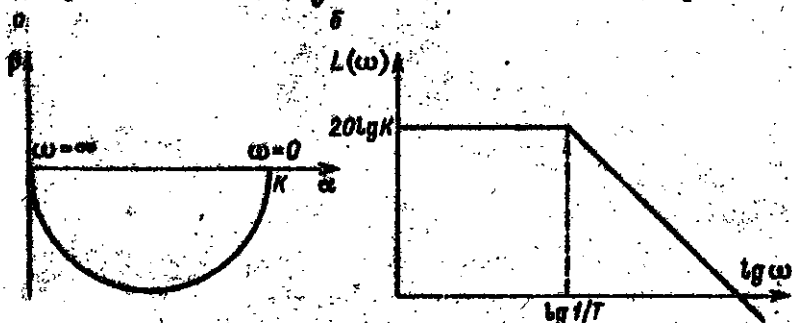


Рис. 8. Характеристики апериодического звена.

$\alpha$  - АФЧХ;  $\delta$  - ЛАЧ.

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика:

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg K - 20 \lg \sqrt{1+T^2\omega^2}. \quad (1.63)$$



При малых значениях  $\omega \ll 1/T$

$$\sqrt{1 + T^2 \omega^2} \approx 1, \quad L(\omega) \approx 20 \lg K. \quad (1.64)$$

С другой стороны, на больших частотах, когда  $\omega \gg 1/T$ :

$$\sqrt{1 + T^2 \omega^2} \approx T\omega, \quad L(\omega) = 20 \lg K - 20 \lg T\omega. \quad (1.65)$$

В соответствии с выражениями (1.64) и (1.65) на рис. 8 приведена ЛАХ апериодического звена.

Примером апериодического звена является рассмотренная ранее емкость.

Колебательное звено. Уравнение этого звена

$$T_1^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_2 \frac{dy}{dt} + y = Kx, \quad (1.66)$$

причем  $T_1$  и  $T_2$  связаны условием

$$\sigma = \frac{T_2}{2T_1} < 1. \quad (1.67)$$

Это условие означает, что корни характеристического уравнения вида

$$T_1^2 p^2 + T_2 p + 1 = 0, \quad (1.68)$$

соответствующего дифференциальному уравнению (1.66), являются комплексными.

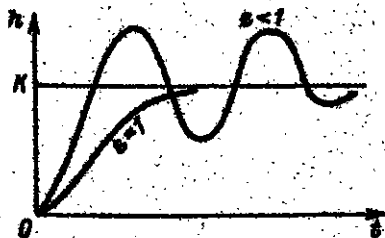


Рис. 9. Переходные функции колебательного звена.

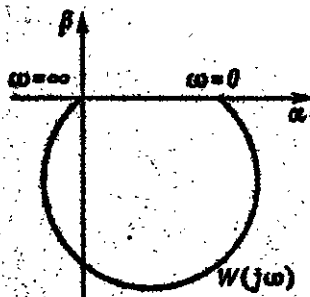


Рис. 10. АФЧХ колебательного звена.

Передаточная функция, соответствующая уравнению (1.66), имеет вид

$$W(p) = \frac{K}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} \quad (1.69)$$

Переходная функция, являющаяся решением уравнения (1.66) при  $x = 1$  ( $z$ ), приведена на рис.9.

Амплитудно-фазовая характеристика равна

$$W(j\omega) = \frac{K}{1 - T_1^2 \omega^2 + j T_2 \omega} = \frac{K(1 - T_1^2 \omega^2) - j K T_2 \omega}{1 - T_1^2 \omega^2 + T_2^2 \omega^2} \quad (1.70)$$

Графический вид этой характеристики приведен на рис.10.

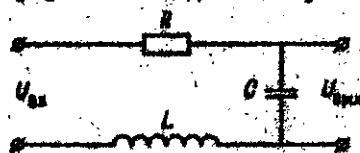


Рис.11. Электрический резонансный контур.

Примером колебательного звена является электрический резонансный контур (рис.11).

Если в уравнении (1.66) выполняется условие

$$\sigma = \frac{T}{2T_1} \gg 1, \quad (1.71)$$

то характеристическое уравнение (1.68) имеет отрицательные действительные корни. В этом случае звено называется апериодическим второго порядка. Примером такого звена является технологическая схема из двух емкостей (рис.12). Все рассмотренные выше звенья называются статическими.



Рис.12. Технологическая схема из двух емкостей.

Интегрирующее звено. Уравнение интегрирующего звена

$$\frac{dy}{dt} = Kx, \quad (1.72)$$

или в интегральной форме

$$y = K \int_0^t x dt + x_0 \quad (1.73)$$

Переходная функция интегрирующего звена

$$h(t) = Kt \quad (1.74)$$

передаточная функция:

$$W(p) = \frac{K}{p} \quad (1.75)$$

амплитудно-фазовая характеристика:

$$W(j\omega) = \frac{K}{j\omega} = -j \frac{K}{\omega} \quad (1.76)$$

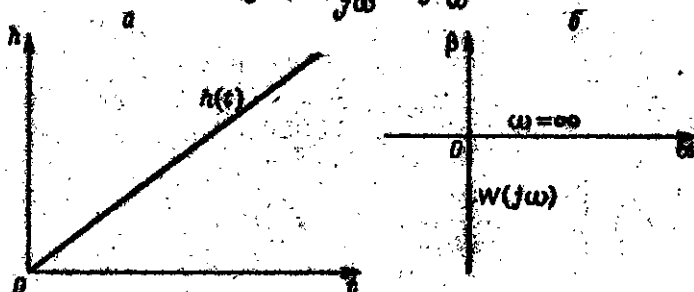


Рис. 1.13. Характеристики интегрирующего звена.

а - переходная; б - АФЧХ.

Характеристики интегрирующего звена приведены на рис. 1.13. Иногда применяется другая форма записи уравнения интегрирующего звена:

$$T \frac{dy}{dt} = x \quad (1.77)$$

Примером интегрирующего звена является

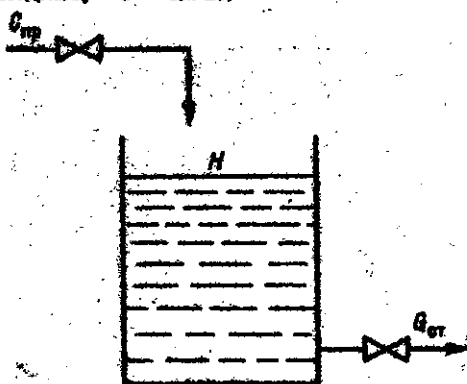


Рис. 1.14. Емкость с притоком жидкости сверху.

емкость с притоком жидкости сверху (рис. 14). Такая емкость не обладает самовыравниванием на притоке. Интегрирующее звено называется астатическим.

**Д и ф ф е р е н ц и р у ю щ е е з в е н о .** Уравнение этого звена

$$y = K \frac{dx}{dt}; \quad (1.78)$$

переходная функция равна

$$h(t) = K\delta(t); \quad (1.79)$$

передаточная функция:

$$W(p) = Kp; \quad (1.80)$$

амплитудно-фазовая характеристика:

$$W(j\omega) = jK\omega, \quad (1.81)$$

т.е. она совпадает с положительной мнимой полуосью.

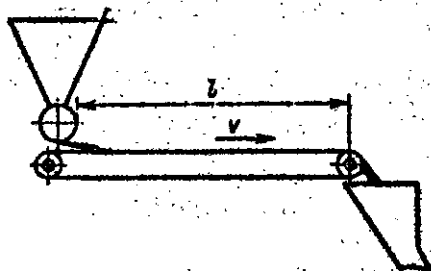


Рис. 15. Транспортер.

Характеристики дифференцирующего звена обратны характеристикам интегрирующего звена. Идеальных дифференцирующих звеньев в природе не существует, но они используются при анализе сложных систем, из которых можно выделить дифференцирующие звенья.

**З в е н о с з а п а з д ы в а н и е м .** Это звено без искажения воспроизводит на выходе входную величину, задерживая ее на время запаздывания  $\tau$ .

Уравнение такого звена имеет вид

$$y(t) = x(t - \tau); \quad (1.82)$$

передаточная функция:

$$W(p) = e^{-\tau p}; \quad (1.83)$$

амплитудно-фазовая характеристика:

$$W(j\omega) = e^{-j\omega\tau} \quad (1.84)$$

Примерами таких звеньев являются транспортеры, длинные трубопроводы и так далее (рис.15).

Если известно расстояние  $l$  и скорость движения ленты транспортера  $v$ , то запаздывание можно определить по формуле

$$\tau = l/v \quad (1.85)$$

**1.3.4. Соединения звеньев. Структурная схема САУ** — это изображение САУ или ее части в виде звеньев со связями между ними.

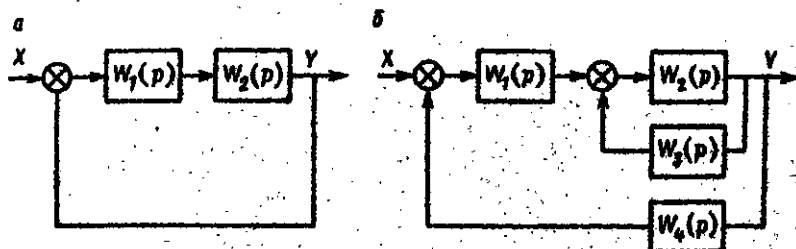


Рис.16. Структурная схема САУ.

$a$  — одноконтурная;  $b$  — многоконтурная.

По виду структурных схем САУ разделяются на одноконтурные и многоконтурные. Одноконтурной (рис.16,  $a$ ) называется

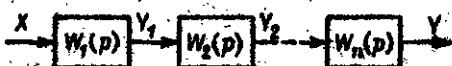


Рис.17. Последовательное соединение звеньев.

система, структурная схема которой имеет вид замкнутого контура, образованного цепочкой последовательно соединенных звеньев. Многоконтурной (рис.16,  $b$ ) называется схема, в структурной схеме которой звенья образуют несколько замкнутых контуров.

**Последовательное соединение звеньев.** При последовательном соединении звеньев (рис.17) имеем систему уравнений

$$\begin{aligned} Y_1 &= W_1(p)X, \\ Y_2 &= W_2(p)Y_1, \\ &\vdots \\ Y &= W_n(p)Y_{n-1}. \end{aligned} \quad (1.86)$$

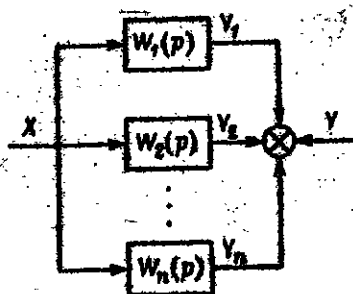


Рис.18. Параллельное соединение звеньев.

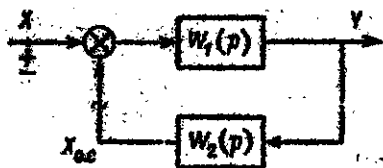


Рис.19. Обратная связь.

$$Y = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n = [W_1(p) + W_2(p) + \dots + W_n(p)]X = \quad (1.89)$$

$$= W(p)X,$$

где

$$W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p). \quad (1.90)$$

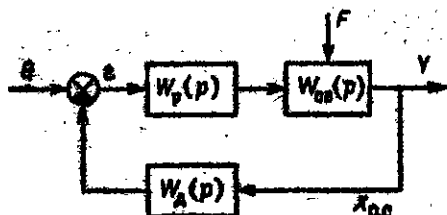


Рис.20. Одноконтурная САУ.

Исключив отсюда промежуточные переменные, получим

$$Y = [W_1(p)W_2(p) \dots$$

$$\dots W_n(p)]X = W(p)X. \quad (1.87)$$

Здесь

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p), \quad (1.88)$$

т.е. передаточная функция последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций звеньев.

Параллельное соединение звеньев. При параллельном соединении звеньев (рис.18)

Таким образом, передаточная функция параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев.

Звено с обратной связью. Обратная связь может быть положительной, если сигнал

на обратной связи складывается со входным сигналом, или отрицательной, если этот сигнал вычитается из входного сигнала

(рис.19). Схема имеет следующую передаточную функцию:

$$W_3(p) = \frac{W_1(p)}{1 \mp W(p)}, \quad (1.91)$$

где  $W(p) = W_1(p)W_2(p). \quad (1.92)$

Здесь положительной обратной связи соответствует минус, а отрицательной — плюс. Функция  $W_3(p)$  называется передаточной функцией замкнутой системы, а  $W(p)$  — передаточной функцией разомкнутой системы, т.е. системы, получающейся после разрыва обратной связи.

О д н о к о н т у р н а я С А У . Схема одноконтурной САУ приведена на рис.20. Она состоит из объекта с передаточной функцией  $W_{об}(p)$ , регулятора, имеющего передаточную функцию  $W_p(p)$ , датчика с передаточной функцией  $W_d(p)$  и сумматора. На схеме обозначены:  $Q$  — задающее воздействие,  $X_{о.с}$  — сигнал обратной связи,  $e = Q - X_{о.с}$  — рассогласование,  $F$  — возмущение,  $Y$  — выходная величина (см.рис.19).

В САУ общая обратная связь всегда отрицательна.

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W(p) = W_p(p)W_{об}(p)W_d(p). \quad (1.93)$$

Передаточная функция замкнутой системы относительно управляющего (задающего) воздействия будет

$$W_y(p) = \frac{Y}{Q} = \frac{W_p(p)W_{об}(p)}{1 + W_p(p)W_{об}(p)W_d(p)}. \quad (1.94)$$

Передаточная функция замкнутой системы относительно возмущающего воздействия равна

$$W_e(p) = \frac{Y}{F} = \frac{W_{об}(p)}{1 + W_p(p)W_{об}(p)W_d(p)}. \quad (1.95)$$

Если обратная связь осуществляется статическим звеном, то она называется жесткой обратной связью, а если дифференцирующим, то гибкой обратной связью. Гибкая обратная связь действует только в динамике. Если задачей САУ является обеспечение

равенства  $Y = Q$ , то в этом случае  $W_d(p) = 1$ , и такая система называется системой с единичной обратной связью.

**1.3.5. Устойчивость САУ.** Понятие устойчивости. Устойчивость — это свойство системы возвращаться в установившийся режим после возмущения.

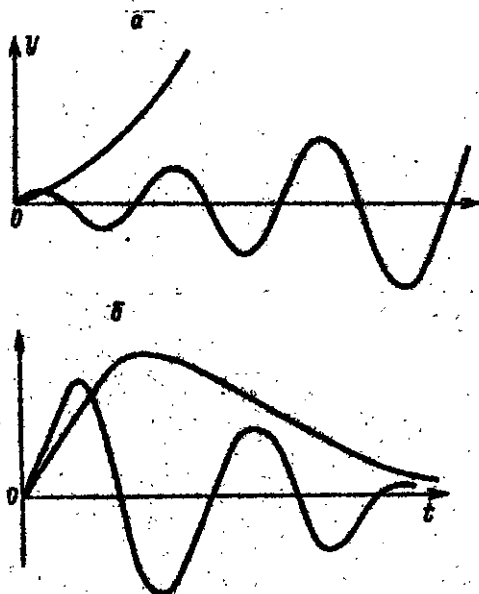


Рис. 21. Переходные процессы.  
а — неустойчивые, б — устойчивые.

На рис. 21 показаны типичные кривые переходных процессов в неустойчивой и устойчивой системах.

Процесс регулирования в линейной САУ описывается решением дифференциального уравнения системы при известных входных воздействиях и заданных начальных условиях:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots$$

$$\dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y =$$

$$= b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x. \quad (1.96)$$

Если в уравнении (1.96) правая часть равна нулю, то оно называется однородным. Уравнение с ненулевой правой частью называется неоднородным. Решение уравнения (1.96) имеет две составляющие:

$$y(t) = y_n(t) + y_s(t), \quad (1.97)$$



где  $y_n(t)$  - общее решение однородного уравнения, описывающее переходный процесс в системе;  $x_n(t)$  - частное решение неоднородного уравнения, описывающее вынужденный режим системы, устанавливающийся по окончании переходного процесса.

Система будет устойчива, если переходные процессы  $y_n(t)$  будут затухающими, т.е. если с течением времени  $y_n(t)$  будет стремиться к нулю.

Решение однородного дифференциального уравнения

$$a_1 \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = 0 \quad (1.98)$$

имеет вид

$$y_n(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{p_i t}, \quad (1.99)$$

где  $C_i$  - постоянные интегрирования, определяющиеся начальными условиями;  $p_i$  - корни характеристического уравнения

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0. \quad (1.100)$$

Таким образом, переходный процесс  $y_n(t)$  представляет собой сумму составляющих, число которых определяется числом корней характеристического уравнения (1.100), т.е. порядком уравнения.

В общем случае корни  $p_i$  являются комплексными:

$$p_{i, i+1} = \alpha_i \pm j\beta. \quad (1.101)$$

В решении дифференциального уравнения системы, описывающем переходный процесс, вещественному корню соответствует слагаемое

$$D_1 = C_i e^{\alpha_i t}, \quad (1.102)$$

а пара комплексно-сопряженных корней - слагаемое

$$D_2 = e^{\alpha_i t} (C_i \cos \beta_i t + C_{i+1} \sin \beta_i t). \quad (1.103)$$

Процесс может быть устойчивым лишь при условии, что все его составляющие с течением времени стремятся к нулю. Устойчивость процесса определяется функцией  $e^{\alpha_i t}$ . Для устойчивости линейной системы необходимо, чтобы все вещественные корни

и вещественные части комплексных корней были отрицательны:

$$p_{i-1} = -\alpha_{i-1}, \quad (1.104)$$

$$p_{i,i+1} = -\alpha_i \pm j\beta_i. \quad (1.105)$$

Наличие пары сопряженных чисто мнимых корней  $p_{i,i+1} = \pm j\beta_i$  дает незатухающую гармоническую составляющую переходного процесса. В этом случае система находится на границе устойчивости и так же неработоспособна, как и неустойчивая система.

Таким образом, исследование устойчивости системы сводится к определению знаков действительных частей корней уравнения. Однако определение корней уравнений выше четвертой степени связано со сложными расчетами. Поэтому разработан ряд оценок, именуемых критериями устойчивости, по которым можно судить об устойчивости, не решая уравнения.

**К р и т е р и й у с т о й ч и в о с т и Р а у с а - Г у р в и ц а.** Это алгебраический критерий, по которому условие устойчивости сводится к выполнению ряда неравенств, связывающих коэффициенты уравнения системы. В разной форме этот критерий был предложен английским математиком Е. Раусом и затем швейцарским математиком А. Гурвицем.

Пусть характеристическое уравнение системы имеет вид

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0, \quad a_0 > 0. \quad (1.106)$$

Составим из коэффициентов этого уравнения определитель:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix}. \quad (1.107)$$

Этот определитель называется определителем Гурвица. Порядок его составления: по главной диагонали выписываются все коэффициенты от  $a_1$  до  $a_n$  в порядке возрастания индексов, столбцы определителя вниз от главной диагонали дополняются коэффициентами с последовательно уменьшающимися индексами, а вверх — с возрастающими индексами; на место коэффициентов, индексы которых больше  $n$  и меньше 0, ставят нули.

САУ устойчива, если определитель Гурвица и все его диагональные миноры положительны.

Условие устойчивости:

- 1) для систем первого порядка  $a_0 > 0, a_1 > 0$ ;
- 2) для систем второго порядка  $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0$ ;
- 3) для систем третьего порядка  $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_2 a_1 > a_3 a_0$  и так далее.

В общем случае необходимым, но не достаточным условием устойчивости является положительность всех коэффициентов уравнения. Лишь для систем первого и второго порядка это условие является и достаточным. Использование критерия Рауса-Гурвица для систем высокого порядка ( $n \geq 4$ ) становится трудным в связи с увеличением объема вычислений.

**К р и т е р и й у с т о й ч и в о с т и М и х а й л о в а .** Это частотный критерий, предложенный советским ученым А.В. Михайловым в 1938 г., основан на изучении годографа вектора комплексной функции, полученной из характеристического многочлена САУ:

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n. \quad (1.108)$$

Подставив  $p = j\omega$ , получаем комплексную функцию

$$D(j\omega) = a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1} j\omega + a_n = U(\omega) + jV(\omega). \quad (1.109)$$

Здесь  $U(\omega)$  — действительная часть, а  $V(\omega)$  — мнимая. Подставив в выражение (1.109) значение  $0 \leq \omega \leq \infty$ , получим ряд значений вектора  $D(j\omega)$ . Кривая, соединяющая концы векторов, называется годографом Михайлова.

САУ устойчива, если годограф Михайлова, начинаясь на действительной положительной полуоси, огибает против часовой

отметки начало координат, проходя последовательно  $n$  квадрантов, где  $n$  — порядок системы.

Условие нахождения системы на границе устойчивости является прохождение годографа Михайлова через начало координат.

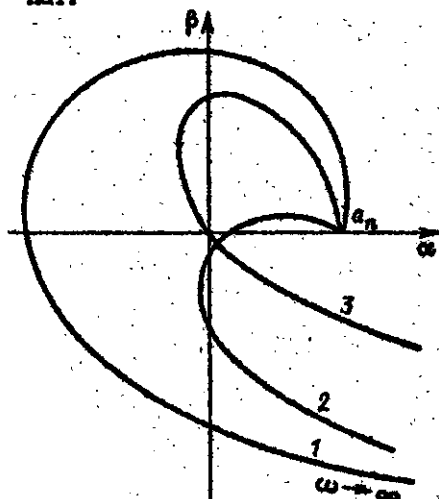


Рис.22. Годографы Михайлова.

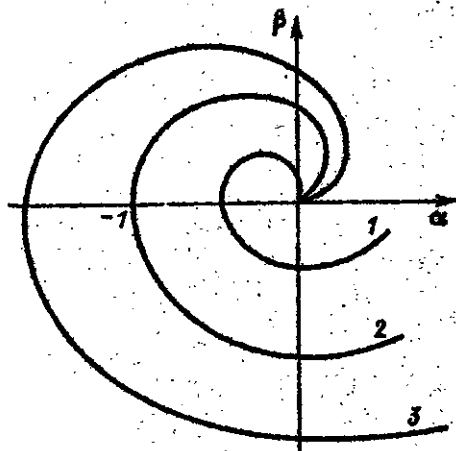


Рис.23. АФЧХ разомкнутых САУ.

На рис.22 приведены примеры годографов Михайлова, соответствующих устойчивой (1), неустойчивой (2) и на границе устойчивости (3) САУ четвертого порядка.

Критерий устойчивости Найквиста. Этот критерий, предложенный в 1932 г. американским ученым Г.Найквистом, позволяет судить об устойчивости замкнутой системы по АФЧХ разомкнутой системы. САУ будет устойчива в замкнутом состоянии, если АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку с координатами  $(-1; j0)$  при изменении частоты в пределах  $0 < \omega < \infty$ .

Если АФЧХ разомкнутой САУ проходит через точку  $(-1; j0)$ , то в замкнутом состоянии система будет находиться на границе устойчивости.

На рис.23 приведены три АФЧХ разомкнутых САУ, соответствующие ус-

стойчивому (1), неустойчивому (3) и на границе устойчивости (2) состояниям.

1.3.6. Исследование аналоговых САУ. Требования к промышленным САУ. Задачей промышленной САУ является поддержание оптимального технологического режима в объекте управления. Заданные значения стабилизируемых технологических величин могут изменяться вручную или с помощью управляющей вычислительной машины (УВМ).

Возмущающие воздействия в промышленных САУ — изменение режимов работы агрегатов, изменение характеристик материальных и энергетических потоков и т.п.

Синтез САУ ставит своей целью обеспечение заданных показателей качества регулирования при возмущениях заданного вида. Одной из задач при синтезе САУ является определение значений параметров настройки регуляторов. Расчет регуляторов производится исходя из требования обеспечить оптимальное качество регулирования.

Показатели качества регулирования. Устойчивость является необходимым условием работоспособности САУ, но недостаточным с точки зрения качества регулирования. Ниже перечислены основные показатели качества регулирования (рис. 24):

$t_p$  — время регулирования, в течение которого регулируемая величина достигает заданного значения;

$x_{\text{дин}}$  — динамическая ошибка, т.е. максимальное отклонение регулируемой величины в переходном процессе;

$x_{\text{пер}}$  — величина перерегулирования;

$\delta_{\text{ост}}$  — статическая ошибка, т.е. остаточное отклонение регулируемой величины после окончания переходного процесса (имеет место только в статических САУ).

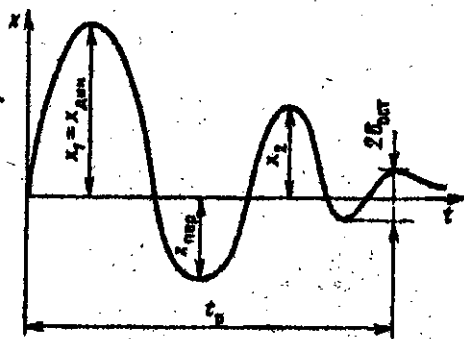


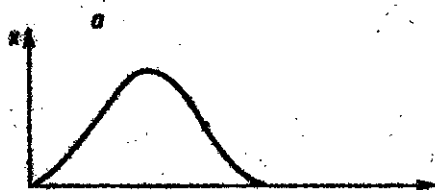
Рис. 24. Показатели качества регулирования.

Перечисленные показатели могут быть определены непосредственно по графику переходного процесса и поэтому называются прямыми.

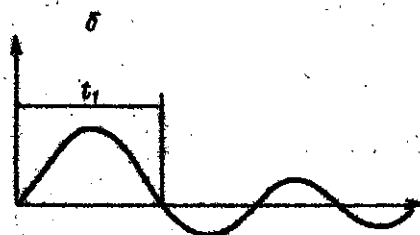
Косвенными показателями качества регулирования являются:

$$\varphi = \frac{x_1 - x_2}{x_1} \quad - \text{степень затухания, характеризует колебательность процесса;}$$

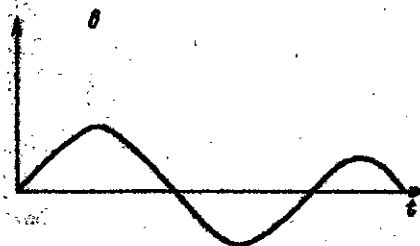
$I_1 = \int_0^{\infty} x(t) dt$  - простейшая интегральная оценка; качество регулирования оценивается по величине площади, заключенной между кривой переходного процесса и осями координат;



данная оценка может быть использована для переходных процессов, не имеющих перерегулирования;



$I_2 = \int_0^{\infty} x^2(t) dt$  - квадратичная интегральная оценка, используется для оценки любых процессов регулирования.



Оптимальные переходные процессы. На основании опытов и теоретических обобщений для промышленных объектов рекомендован ряд оптимальных переходных процессов регулирования (рис. 25).

1. Аперiodический переходный процесс; характеризуется минимальным временем регулирования, отсутствием пе-

Рис. 25. Оптимальные переходные процессы.

$a$  - аперiodический,  $b$  - с 20%-ным перерегулированием;  $c$  - с минимальной квадратичной площадью.

перерегулирования и максимальным динамическим отклонением.

2. Затухающий колебательный переходный процесс с 20%-ным перерегулированием; характеризуется минимальными динамическим отклонением и временем первого полупериода колебаний  $t_1$ .

3. Затухающий колебательный переходный процесс с минимальной квадратичной площадью:

$$I_{2\min} = \int_0^{t_p} x^2(t) dt;$$

характеризуется 40–45% перерегулированием и максимальным временем регулирования, имеет наименьшее динамическое отклонение.

Типы регуляторов. По характеру действия регуляторы бывают релейные, импульсные и непрерывные.

Релейные (позиционные) регуляторы осуществляют ступенчатое управляющее воздействие. Наиболее распространены двухпозиционные регуляторы. В этом случае регулируемый орган может принимать одно из двух предельных положений: открыто или закрыто.

Импульсные регуляторы имеют в своей структуре импульсное звено и коммутирующее устройство. Регулятор позволяет управлять одним или несколькими инерционными объектами, так как изменение регулирующего воздействия носит дискретный характер.

Непрерывные промышленные регуляторы в зависимости от реализуемого закона регулирования бывают пропорциональные, пропорционально-интегральные и пропорционально-интегрально-дифференциальные.

Пропорциональный регулятор (П-регулятор) производит перемещение регулирующего органа пропорционально отклонению регулируемой величины от заданного значения.

Уравнение П-регулятора:

$$y = K_p x, \quad (1.110)$$

где  $K_p$  — коэффициент усиления регулятора.

Передаточная функция П-регулятора:

$$W(p) = K_p; \quad (1.111)$$

амплитудно-фазовая и переходная характеристики:

$$W(j\omega) = K_p, \quad (1.112)$$

$$h(t) = K_p. \quad (1.113)$$

Недостатком П-регуляторов является зависимость регулируемой величины от нагрузки. Это явление называется остаточной неравномерностью регулирования (статической ошибкой). Параметром настройки П-регулятора является диапазон дросселирования, равный

$$\delta = \frac{1}{K_p} \cdot 100\%, \quad (1.114)$$

Пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) производит перемещение регулирующего органа пропорционально сумме отклонения и интеграла от отклонения регулируемой величины.

Уравнение ПИ-регулятора:

$$y = K_p \left( x + \frac{1}{T_n} \int_0^t x dt \right), \quad (1.115)$$

где  $K_p$  - коэффициент усиления регулятора;  $T_n$  - время изодромы (интегрирования).

При  $T_n \rightarrow \infty$  ПИ-регулятор превращается в П-регулятор.

Передачная функция, амплитудно-фазовая и переходная характеристики ПИ-регулятора равны

$$W(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_n p} \right), \quad (1.116)$$

$$W(j\omega) = K_p \left( 1 - j \frac{1}{T_n \omega} \right), \quad (1.117)$$

$$h(t) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_n} t \right). \quad (1.118)$$

Переходная характеристика ПИ-регулятора приведена на рис. 26, а.

За время  $t = T_n$  интегрирования составляющая становится равной пропорциональной, т.е. сигнал удваивается. Поэтому время изодромы называют временем удвоения.



Так как интегральная составляющая вводится воздействием на упругую обратную связь (изодром), то ПИ-регуляторы называются изодромными.

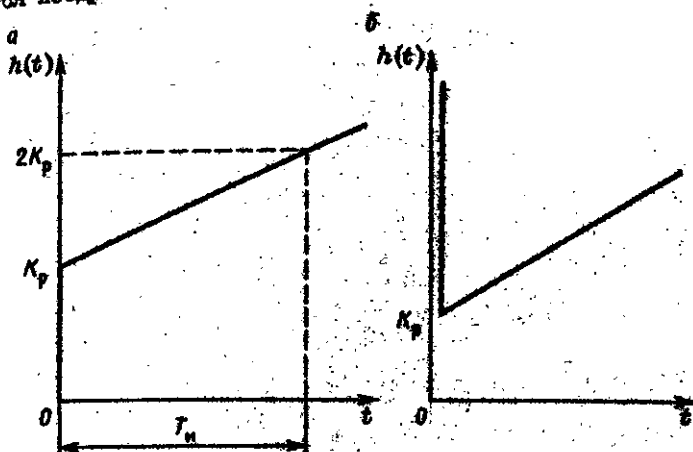


Рис. 26. Переходные характеристики.  
а - ПИ-регулятора; б - ПИД-регулятора.

Параметры настройки ПИ-регулятора: диапазон дросселирования  $\delta$  и время изодрома  $T_n$ .

ПИ-регуляторы позволяют регулировать параметры без остаточной неравномерности.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор) производит перемещение регулирующего органа пропорционально отклонению, интегралу и скорости изменения регулируемой величины.

Уравнение ПИД-регулятора:

$$y = K_p \left( x + \frac{1}{T_n} \int_0^t x dt + T_{\text{диф}} \frac{dx}{dt} \right), \quad (1.119)$$

где  $K_p$  - коэффициент усиления регулятора;  $T_{\text{диф}}$  - время дифференцирования.

При  $T_{\text{диф}} = 0$  ПИД-регулятор превращается в ПИ-регулятор.

Передающая функция ПИД-регулятора:

$$W(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_n p} + T_{диф} p \right). \quad (1.120)$$

Амплитудно-фазовая характеристика:

$$W(j\omega) = K_p \left( 1 - \frac{1}{T_n \omega} + j T_{диф} \omega \right). \quad (1.121)$$

Переходная характеристика:

$$\begin{aligned} h(t) &= \infty & \text{при} & \quad t = 0, \\ h(t) &= K_p \left( 1 + \frac{1}{T_n} t \right) & \text{при} & \quad t > 0. \end{aligned} \quad (1.122)$$

График переходной характеристики ПИД-регулятора приведен на рис. 26, б.

Параметры настройки ПИД-регулятора: диапазон дросселирования  $\delta$ , время издержки  $T_n$  и время предварения  $T_{диф}$ .

Исходные данные для расчета автоматического регулятора. Для расчета автоматического регулятора непрерывного действия необходимо иметь следующие исходные данные:

1. Динамические характеристики объекта:

- а) постоянная времени  $T$ , с;
- б) запаздывание  $\tau$ , с;
- в) коэффициент усиления  $K_{об}$ .

2. Максимально возможное возмущение по нагрузке  $\mu$ .

3. Требуемые показатели качества регулирования:

- а) максимально допустимое динамическое отклонение  $A_1$ ;
- б) допустимое перерегулирование  $A_2$  в процентах к  $A_1$ ;
- в) допустимое остаточное отклонение  $\delta_{ост}$ ;
- г) предельно допустимое время регулирования  $t_p$ , с.

Расчет регулятора сводится к выбору типа регулятора и расчету оптимальных параметров настройки.

Выбор типа автоматического регулятора. Расчет промышленных САУ может быть проведен различными методами: аналитическим, методом математического моделирования на электронной аналоговой вычислительной машине, графоаналитическим методом и экспериментально.

Общедоступным является графоаналитический метод, достоинствами которого являются его простота и достаточная точность результатов. Сущность этого метода состоит в том, что расчет регулятора производится по заранее составленным графикам с учетом динамических свойств САУ и требований к качеству переходного процесса.

При выборе типа регулятора следует прежде всего определить характер действия регулятора. Ориентировочно выбор может быть сделан исходя из величины отношения запаздывания  $\tau$  к постоянной времени объекта  $T$ :

при  $\tau/T < 1,0$  выбирается регулятор непрерывного действия;

при  $\tau/T < 0,2$  выбирается регулятор релейного действия;

при  $\tau/T > 1,0$  выбирается регулятор импульсного действия. После определения характера действия регулятора переходит к выбору типа регулятора (закона регулирования).

Выбор типа регулятора производится по величине динамического коэффициента регулирования, определяемого по формуле:

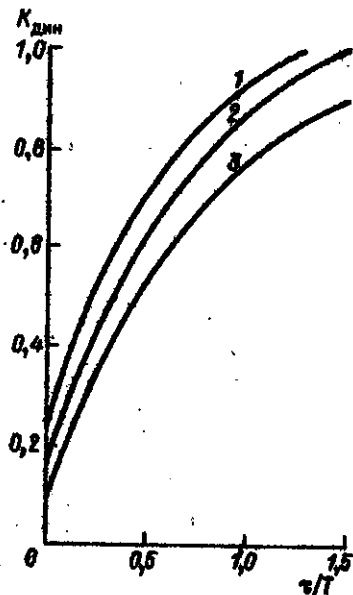


Рис. 27. Графики выбора типа регулятора.

$$K_{дин} = \frac{A_1}{A_{об} \psi}, \quad (1.123)$$

где  $A_{об}$  — коэффициент усиления объекта.

Имея численное значение  $K_{дин}$  и задаваясь типом оптимального переходного процесса, по графикам функциональной зависимости  $K_{дин}$  от  $\tau/T$  находят тип регулятора (П-, ПИ-, или ПИД-), обеспечивающего при заданном  $\tau/T$  необходимое значение  $K_{дин}$ .

В качестве примера на рис. 27 приведены графики функциональной зависимости  $K_{дин}$  от  $\tau/T$  при асимптотическом пере-

ходном процессе для различных типов регуляторов (1 - П-регулятор, 2 - ПИ-регулятор, 3 - ПИД-регулятор).

Из графиков следует, что при увеличении у регулируемого объекта отношения  $\sigma/T$  для достижения одного и того же значения  $K_{дин}$  приходится применять регуляторы все более сложных типов.

Выбранный тип регулятора далее проверяется на соответствие фактического времени регулирования заданному и фактического остаточного отклонения регулируемой величины заданному значению (последнее только для П-регуляторов). Такие проверки осуществляются по специальным графикам [23, 24].

Определение оптимальных параметров настройки регулятора. К промышленным САУ предъявляются следующие требования:

- 1) система должна обладать заданным запасом устойчивости;
- 2) динамическая ошибка, величина перерегулирования и статическая ошибка не должны быть больше заданных;
- 3) время регулирования должно быть минимальным.

Выполнение двух последних требований возможно при минимизации одного из указанных ниже интегральных критериев:

$$J_1 = \int_0^t x(t) dt, \quad J_2 = \int_0^t x^2(t) dt.$$

Большинство методов определения оптимальных параметров настройки регуляторов предусматривает решение задачи в два этапа:

- 1) Определение области, соответствующей заданному запасу устойчивости. В качестве критерия оптимальности на этом этапе обычно используется показатель колебательности:

$$M = \frac{|W(j\omega)|_{\max}}{|W(j\omega)|_0}, \quad (1.124)$$

где  $|W(j\omega)|_{\max}$  - максимум АЧХ замкнутой системы;  $|W(j\omega)|_0$  - АЧХ замкнутой системы при  $\omega = 0$ .

Обычно считается, что система обладает необходимым запасом устойчивости, если  $M = 1,62 + 1,29$ .

2. Определение в выделенной области оптимальных параметров настроек. В качестве критерия оптимальности на этом

этапе используются интегральные критерии  $J_1$  и  $J_2$ .

Для объектов высокого порядка расчет регуляторов сопровождается сложными вычислениями. Для объектов первого порядка с запаздыванием расчет может быть проведен с помощью специальных таблиц (табл. 1) или по графикам.

Т а б л и ц а 1. Оптимальные значения параметров настройки регуляторов для объектов с самовыравниванием

Тип регулятора	Оптимальный переходный процесс		
	Апериодический	Колебательный с 20%-ым пере- регулированием	Колебательный с минимальной площадью
П	$K_p = \frac{0,3}{K_{об} \tau / T}$	$K_p = \frac{0,7}{K_{об} \tau / T}$	$K_p = \frac{0,9}{K_{об} \tau / T}$
ПИ	$K_p = \frac{0,6}{K_{об} \tau / T}$	$K_p = \frac{0,7}{K_{об} \tau / T}$	$K_p = \frac{1,0}{K_{об} \tau / T}$
	$T_H = 0,8 \tau + 0,5 T$	$T_H = \tau + 0,3 T$	$T_H = \tau + 0,35 T$
ПИД	$K_p = \frac{0,95}{K_{об} \tau / T}$	$K_p = \frac{1,2}{K_{об} \tau / T}$	$K_p = \frac{1,4}{K_{об} \tau / T}$
	$T_H = 2,4 \tau$	$T_H = 2,0 \tau$	$T_H = 1,3 \tau$
	$T_{диф} = 0,4 \tau$	$T_{диф} = 0,4 \tau$	$T_{диф} = 0,5 \tau$

Построение переходных процессов в САУ, вызванных основными для данной системы воздействиями, является завершающим этапом исследования системы.

Существуют две группы методов построения переходных процессов: аналитические методы и графические методы с использованием частотных характеристик.

Аналитические методы основаны на решении дифференциального уравнения системы. Общая методика решения дифференциальных уравнений приведена раньше (см. п. 1.3.5).

В качестве конкретного примера рассмотрим построение переходного процесса при регулировании уровня в емкости.

САУ описывается следующими уравнениями:  
уравнение объекта

$$T \frac{dH}{dt} + H = K_y S_y + K_o S_o; \quad (1.125)$$

уравнение ПИ-регулятора

$$P_y = -K_p \left( H + \frac{1}{T_n} \int H dt \right); \quad (1.126)$$

уравнение исполнительного механизма и регулирующего органа

$$S_y = P_y. \quad (1.127)$$

Подставляя значение  $S_y$  в уравнение (1.125), получим

$$T \frac{dH}{dt} + H + K_y K_p H + \frac{K_y K_p}{T_n} \int H dt = K_o S_o. \quad (1.128)$$

После дифференцирования находим уравнение системы регулирования:

$$T \frac{d^2 H}{dt^2} + (1 + K_y K_p) \frac{dH}{dt} + \frac{K_y K_p}{T_n} H = K_o \frac{dS_o}{dt}. \quad (1.129)$$

Допустим, что в некоторый момент  $t = 0$  возникло ступенчатое возмущение  $S_o = 1$ .

Начальные условия:

$$H|_{t=0} = 0, \quad \frac{dH}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{K_o}{T}. \quad (1.130)$$

Последнее условие получено из уравнения (1.128) при  $t = 0$  и  $S_o = 1$ .

Характеристическое уравнение системы (I.129) имеет вид

$$T p^2 + (1 + K_y K_p) p + \frac{K_y K_p}{T_m} = 0. \quad (I.131)$$

Корни уравнения (I.131) равны

$$p_{1,2} = \frac{-(1 + K_y K_p) \pm \sqrt{(1 + K_y K_p)^2 - 4 T K_y K_p / T_m}}{2 T}. \quad (I.132)$$

Если корни  $p_{1,2}$  вещественные, то решение дифференциального уравнения имеет вид

$$H = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t}. \quad (I.133)$$

Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  определим из начальных условий.

При  $t=0$  из уравнения (I.133) имеем

$$0 = C_1 + C_2. \quad (I.134)$$

Дифференцируя уравнение (I.133), при  $t=0$  имеем

$$\frac{K_0}{T} = C_1 p_1 + C_2 p_2. \quad (I.135)$$

Из уравнений (I.134) и (I.135) находим  $C_1$  и  $C_2$ :

$$C_1 = -C_2 = \frac{K_0 / T}{p_1 - p_2}. \quad (I.136)$$

Подставляя значения  $C_1$  и  $C_2$  в уравнение (I.133), окончательно получим решение в виде

$$H = \frac{K_0}{T(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (I.137)$$

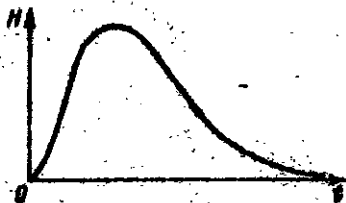


Рис. 28. Аperiodический переходный процесс.

По уравнению (I.137) может быть построен график переходного процесса (рис.28).

Графические методы построения переходных процессов основаны на применении частотных характеристик.

Амплитудно-фазовую характеристику замкнутой САУ можно представить в виде

$$U_3(j\omega) = U_3(\omega) + jV(\omega). \quad (1.138)$$

Переходная функция связана с действительной частотной характеристикой выражением

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{U_3(\omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega. \quad (1.139)$$

С помощью выражения (1.139) можно построить искомую переходную функцию  $h(t)$  путем графического нахождения входящих в нее интегралов по заданному графику частотной характеристики  $U_3(\omega)$ . Методика такого построения, разработанная В.В.Солодовниковым, называется методом трапеций.

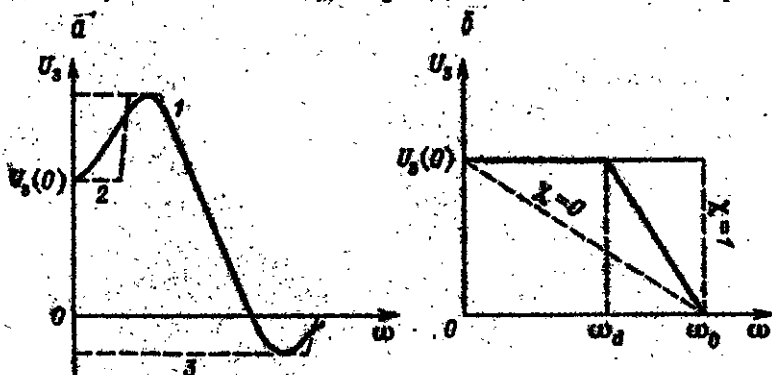


Рис.29. Построение переходной характеристики.  
а - разбивка на трапеции; б - параметры трапеций.

Действительную характеристику  $U_3(\omega)$  заменим ломаной линией (рис.29, а). В результате  $U_3(\omega)$  представим алгебраической суммой нескольких трапеций  $U_{3i}(\omega)$  (трапеции 1-3 на рис.29, а). Соответственно искомую переходную характеристику  $h(t)$  можно записать в виде алгебраической суммы нескольких составляющих, каждая из которых определяется одной из трапеций, т.е.

$$h(t) = \sum h_i(t), \quad (1.140)$$



где

$$h_i(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{U_{ji}(\omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega.$$

Для характеристики, изображенной на рис. 29, а, получаются три трапеции: трапеция 1 входит в сумму (1.140) со знаком плюс, а трапеции 2 и 3 — со знаком минус.

Построение отдельных составляющих  $h_i(t)$  осуществляется с помощью специальных таблиц переходных функций  $h(\tau)$ , рассчитанных для нормированных трапеций [44]. Нормированные трапеции имеют параметры  $U_{ji}(0) = 1$ ,  $\omega_0 = 1$  и, таким образом, каждая характеризуется одним варьируемым параметром  $\chi = \omega_{di}/\omega_0$ , который может иметь значения от нуля (трапеция превращается в треугольник) до единицы (трапеция превращается в прямоугольник).

Для каждой составляющей характеристики находим три определяющих ее параметра: высоту  $U_{ji}(0)$  и частоты  $\omega_{0i}$  и  $\omega_{di}$  (рис. 29, б). По значениям  $\omega_{0i}$  и  $\omega_{di}$  вычисляем коэффициент  $\chi_i = \omega_{di}/\omega_{0i}$  и в таблице находим соответствующую ему функцию  $h_i(\tau)$ . Искомую составляющую  $h_i(t)$  получаем из этой функции путем умножения ординат  $h_i(\tau)$  на величину  $U_{ji}(0)$  и деления абсцисс  $\tau$  на величину  $\omega_0$ .

#### 1.4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ САУ

**1.4.1. Нелинейные автоматические системы управления.** Автоматическая система регулирования, в состав которой включены звенья, имеющие нелинейную статическую характеристику, называется нелинейной. В данном случае речь идет о существенно нелинейных звеньях, статические характеристики которых не могут быть линейризованы известными методами без потери их существенных особенностей. В настоящее время из всего многообразия нелинейных характеристик выделен класс существенно нелинейных, которые могут быть отнесены к типичным нелинейностям. Такие характеристики включают в себя зоны нечувствительности, насыщения, гистерезиса и т.п. Существенно нелинейными могут быть характеристики различных звеньев системы регулирования: датчиков, исполнительных механизмов, регуляторов. Широкое применение в автоматизации производственных процессов получили

нелинейные системы регулирования с регуляторами, имеющими релейную статическую характеристику. Это так называемые системы позиционного регулирования.

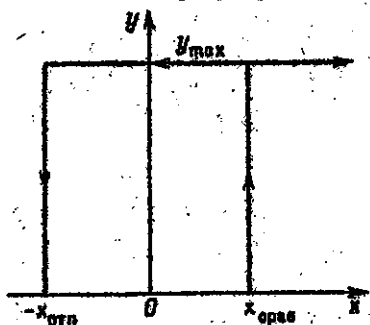


Рис. 30. Статическая характеристика позиционного (релейного) регулятора.

Сигнал на выходе позиционного регулятора в зависимости от величины входного сигнала  $x$  может принимать одно из двух возможных постоянных значений  $y_{\max}$  или  $y_{\min}$ . Последнее в частном случае может равняться нулю (рис. 30).

При достижении входным сигналом величины порога срабатывания  $x_{\text{сраб}}$  выходной сигнал изменяется скачкообразно от минимального значения  $y_{\min}$  до максимального  $y_{\max}$ . При даль-

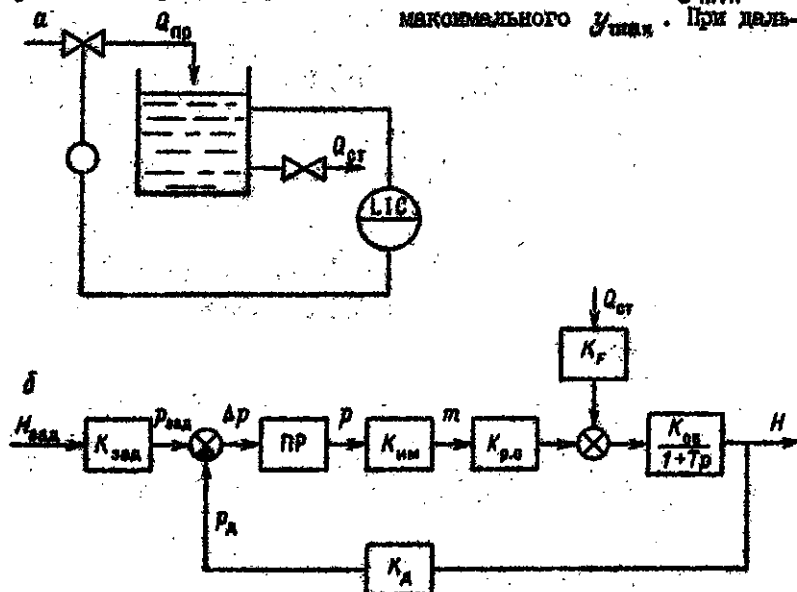


Рис. 31. Автоматическая система регулирования уровня с позиционным регулятором (ПР).

$a$  - функциональная схема (по ГОСТ 21.404-85);  $б$  - структурная схема.

наибольшем увеличении сигнала выходная величина не изменится, сохраняя свое максимальное значение  $Y_{\max}$ . Если теперь уменьшать входной сигнал, то при достижении им порога отпущения  $X_{\text{отп}}$  выходной сигнал уменьшится скачком до минимальной величины  $Y_{\min}$ . Разность  $\Delta x = x_{\text{сраб}} - x_{\text{отп}}$  называют зоной неоднозначности. Характеристику, подобную изображенной на рис. 30, имеет позиционный пневматический регулятор системы "Старт" ПР1.5. Последняя модификация этого регулятора ПР1.6 позволяет изменить величину зоны неоднозначности.

В качестве примера рассмотрим работу автоматической системы регулирования уровня жидкости в емкости с позиционным регулятором ПР1.6, функциональная и структурная схема которой показаны на рис. 31.

Проиллюстрируем работу системы регулирования графиками. Когда уровень жидкости в емкости в результате стока упадет ниже заданного значения  $H_{\text{зад}}$  и величина ошибки регулирования  $\Delta p = -(K_{\text{зад}} H_{\text{зад}} - K_d H) = -(p_{\text{зад}} - p_d)$ , где  $K_{\text{зад}}$  - коэффициент усиления задающего устройства, достигает значения  $x_{\text{сраб}} = p_{\text{сраб}}$ , сигнал на выходе регулятора примет в соответствии с его статической характеристикой свое максимальное значение  $Y_{\max} = p_{\max}$ . В результате этого клапан подачи жидкости в емкость полностью откроется и расход жидкости на входе в емкость достигнет своего максимального значения  $Q_{\text{пр max}}$ . Так как максимальное значение расхода на притоке  $Q_{\text{пр max}}$  выбирают большим, чем номинальное значение расхода на стоке  $Q_{\text{ст.с}}$ , то уровень будет возрастать и к моменту времени  $t_1$  превзойдет заданное значение. При этом сигнал на входе регулятора достигнет

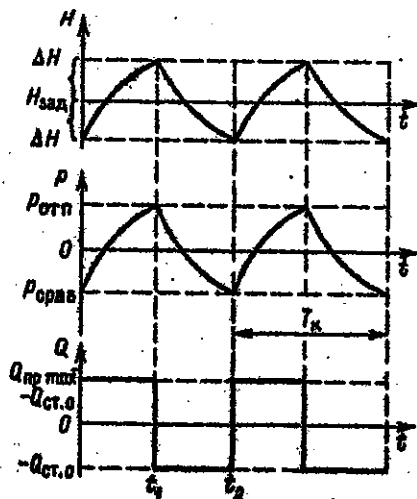


Рис. 32. Переходные процессы в автоматической системе регулирования с позиционным регулятором.

порога отсувания  $\varphi_{отп} = P_{отп}$ . В соответствии со статической характеристикой регулятора сигнал на его выходе примет свое минимальное значение  $y_{min} = P_{min} = 0$ . Это приведет к закрытию клапана подачи на приток и к уменьшению расхода через него до нуля. Под действием расхода на стоке уровень начинает падать до момента  $t_2$ , после чего все процессы повторяются. Соответствующие переходные процессы приведены на рис. 32.

В устанавливаемом состоянии, что имеет место при постоянном расходе жидкости на стоке, в автоматической системе регулирования с позиционным регулятором возникают автоколебания регулируемой величины относительно ее заданного значения. Диапазон колебаний регулируемой величины  $2\Delta H$  и период колебаний  $T_k$  можно изменять, меняя параметры статической характеристики регулятора ( $P_{сраб}$  и  $P_{отп}$ ).

Если по условиям технологии необходимо строго поддерживать заданное значение величины, то применяют линейные системы регулирования с непрерывными регуляторами. Если же допустимы колебания регулируемой величины в пределах  $\pm \Delta$ , то предпочтением отдается более простым и дешевым позиционным регуляторам.

**1.4.2. Дискретные автоматические системы управления.** В автоматических системах управления применяются два основных способа передачи и преобразования сигналов — непрерывный и дискретный.

При непрерывном способе передается и преобразуется каждое мгновенное значение сигнала, а при дискретном — сигнал, квантованный по времени или уровню.

Различают три вида квантования сигналов — по времени, по уровню и одновременно по времени и уровню. Автоматические системы управления, в которых имеет место процесс квантования сигналов по времени, называются импульсными. Системы, в которых осуществляется квантование по уровню, являются релейные (позиционные) автоматические системы управления. Системы, в которых происходит процесс квантования сигналов по времени и уровню, называются цифровыми автоматическими системами управления.

Работа дискретных систем связана с воздействием, передачей и преобразованием последовательности импульсов. Разработка методов расчета дискретных систем регулирования связана в первую очередь с применением цифровых вычислительных устройств в контуре управления. Информация, обрабатываемая в цифровых вы-

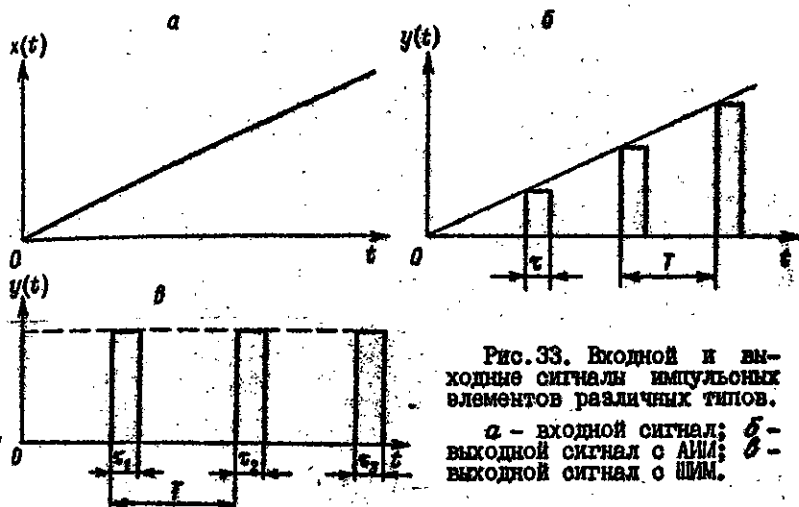


Рис. 33. Входной и выходные сигналы импульсных элементов различных типов.

$a$  - входной сигнал;  $б$  - выходной сигнал с АИМ;  $в$  - выходной сигнал с ПШМ.

числительных устройствах, представляет собой комбинации электрических импульсов или так называемые кодовые комбинации. При использовании цифровой вычислительной машины в качестве регулятора необходимо предусмотреть в составе системы регулирования устройства, преобразующие непрерывные сигналы в кодовые комбинации для ввода в ЦВМ, а также устройства, преобразующие коды в непрерывные сигналы для вывода управляющих воздействий из ЦВМ. Таким образом, структурная схема дискретной системы представляет собой сочетание аналоговой части и импульсного элемента.

Импульсный элемент представляет собой модулятор импульсов, преобразующий непрерывно изменяющийся входной сигнал  $x(t)$  в последовательность модулированных импульсов  $y(t)$ . Различные виды модуляции приведены на рис. 33. При амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) непрерывный сигнал преобразуется в последовательность импульсов с постоянной длительностью  $\tau$  и пери-

одом следования  $T$ , амплитуда которых пропорциональна амплитуде непрерывного сигнала.

Для широтно-импульсной модуляции (ШИМ) непрерывный входной сигнал преобразуется в последовательность импульсов с постоянными амплитудой и периодом следования, длительность которых пропорциональна величине входного сигнала.

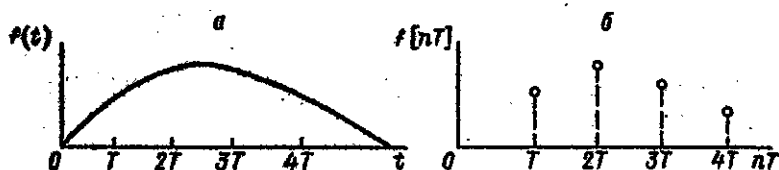


Рис. 34. Замена непрерывной функции решетчатой.

$a$  - непрерывная,  $b$  - решетчатая.

Наличие в структурной схеме дискретной системы импульсного элемента приводит к тому, что любая дискретная система реагирует на внешнее непрерывное воздействие лишь в дискретные равностоящие друг от друга моменты времени. При анализе дискретных систем непрерывную функцию времени  $f(t)$  заменяют решетчатой функцией  $f[nT]$ , значения которой изменяются при дискретных равностоящих значениях независимой переменной  $t$ . Между этими значениями решетчатая функция равна нулю (рис. 34).

Подобно тому, как скорость изменения непрерывной функции характеризуется первой производной  $df/dt$ , скорость изменения решетчатой функции характеризуется ее первой разностью

$$\frac{\Delta f[nT]}{T} = \frac{f[(n+1)T] - f[nT]}{T}. \quad (1.141)$$

Умножив левую и правую части на  $T$ , получим

$$\Delta f[nT] = f[(n+1)T] - f[nT]. \quad (1.142)$$

Аналогично вторая разность

$$\begin{aligned} \Delta^2 f[nT] &= \Delta f[(n+1)T] - \Delta f[nT] = \\ &= f[(n+2)T] - f[(n+1)T] - f[(n+1)T] + f[nT] = \\ &= f[(n+2)T] - 2f[(n+1)T] + f[nT]. \end{aligned} \quad (1.143)$$

Если работа непрерывных систем описывалась обыкновенными дифференциальными уравнениями, содержащими функцию и ее производные, то работа дискретных систем описывается уравнением в конечных разностях или разностным уравнением, которое содержит решетчатую функцию и ее разности.

Апериодическое звено 1-го порядка в непрерывных системах описывается дифференциальным уравнением вида

$$a \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t). \quad (1.144)$$

В дискретных системах это звено описывается разностным уравнением

$$ay[(n+1)T] - ay[nT] + y[nT] = Kx[nT]. \quad (1.145)$$

Методы решения разностных и дифференциальных уравнений аналогичны. Для решения обыкновенных дифференциальных уравнений при расчете непрерывных систем широко применяется операторный метод, основанный на преобразованиях Лапласа. Для решения разностных уравнений применяют аналогичный метод, основанный на дискретных преобразованиях Лапласа.

1.4.3. Оптимальные автоматические системы управления. В обычных автоматических системах управления требуемое значение управляемой величины задавалось заранее либо постоянным (в системах стабилизации), либо изменявшимся по заданной программе во времени (системы программного управления). Оптимальные системы управления сами ищут наиболее выгодную программу, т.е. то значение управляемой величины, которое нужно в данный момент поддерживать, чтобы режим работы управляемого объекта был оптимальным (наиболее выгодным). Обязательным условием оптимальной системы управления является наличие экстремума (максимума или минимума). Поэтому эти системы иногда называют экстремальными по оптимизируемому параметру. Эта характеристика представляет собой зависимость оптимизируемого параметра от управляемой величины. Экстремальной, например, является зависимость расхода горючего  $Q$  в двигателе от скорости его вращения  $n$  при постоянной нагрузке  $M_f$ . Для широкого диапазона нагрузок имеем свойство экстремальных характеристик, у каждой из которых свой экстремум  $Q_f$  (рис.35).

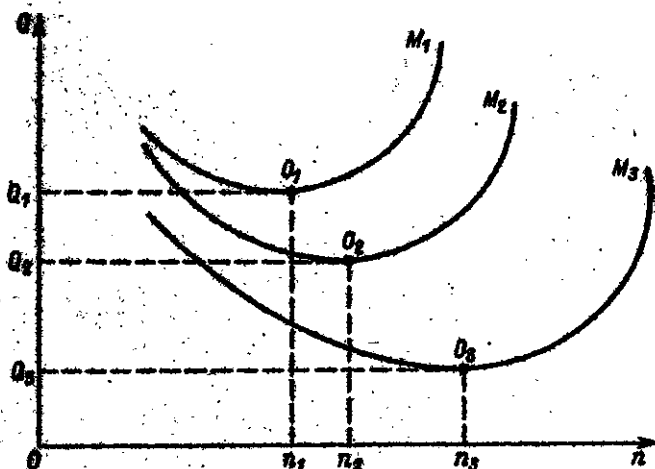


Рис.35. Семейство экстремальных характеристик объекта.

Задачей оптимальной автоматической системы управления в данном случае является обеспечение минимального расхода горючего  $Q$  при различных нагрузках двигателя  $M$ . Устройство автоматического поиска экстремума, называемое оптимизатором, ищет минимальное значение расхода горючего при данной нагрузке (например, расход  $Q_3$  при нагрузке  $M_3$ ) и определяет значение управляющего воздействия  $n_3$ , которое обеспечивает требуемый оптимум. Сигнал с выхода оптимизатора  $n_2$  может быть подан в виде задания регулятору (рис.36).

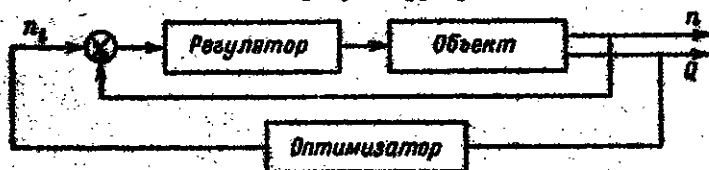


Рис.36. Структурная схема автоматической системы оптимального регулирования.

Различные виды оптимизаторов отличаются друг от друга способом поиска экстремума. Один из них называется способом последовательных шагов (рис.37). Пусть ищется максимум экстре-



мальной характеристики. Сначала дается принудительное изменение величины  $x$  в какую-либо сторону на  $\Delta$ . Если получившаяся разность  $z_{n+1} - z_n > 0$ , то дают новое приращение  $x$  на величину  $\Delta$  в ту же сторону. Если  $z_{n+1} - z_n < 0$ , то производится переключение направления изменения  $x$  на обратную сторону на такой же шаг  $\Delta$  и т.д. В результате система будет колебаться около точки экстремума  $x_0$ . Существуют и другие способы поиска экстремума.

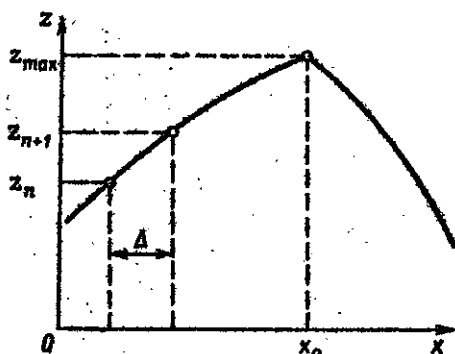


Рис. 37. Поиск максимума методом последовательных шагов.

Итак, оптимальные системы управления отличаются от обычных тем, что в них производится автоматическая настройка требуемого значения величины.

1.4.4. Адаптивные автоматические системы управления. Расчет автоматических систем управления производится в предположении, что параметры объекта заранее известны и в процессе эксплуатации не меняются. При этом определяют настройки регулятора по соображениям желаемого качества регулирования, которые в дальнейшем также не меняют.

На практике во многих случаях параметры объекта в процессе эксплуатации могут меняться. Так, например, в теплообменных аппаратах в результате образования накипи может изменяться теплоотдача. Если этот факт в дальнейшем не учитывать и оставить настройки регулятора без изменения, то качество регулирования может со временем сильно отличаться от желаемого. Поэтому в составе системы управления желательно предусмотреть устройство, которое изменило бы настройки регулятора при изменении параметров объекта таким образом, чтобы качество регулирования не менялось. Система с таким устройством как бы приспособляется к изменяющимся условиям функционирования (адаптируется). Поэтому подобные системы называют адаптивными.

Адаптивная система представляет собой обычную автоматическую систему управления, дополненную устройством адаптации или самонастройки (рис. 38).

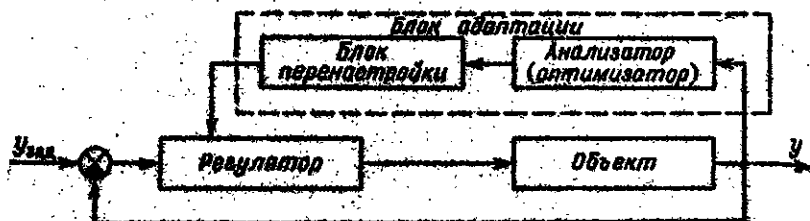


Рис. 38. Структурная схема адаптивной автоматической системы регулирования.

Анализатор, входящий в состав блока адаптации, сравнивает текущие значения показателей качества системы управления с желаемыми и вырабатывает воздействие на блок перенастройки.

В зависимости от сложности блока адаптации могут решаться различные задачи, начиная от изменения коэффициентов настройки регулятора и перемены структуры системы до ее самообучения в случае применения цифровых вычислительных машин.

## Глава 2

### ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Чтобы экономически и технически целесообразно решить проблему обеспечения средствами контроля и автоматизации систем автоматизации технологических процессов, необходима унификация средств автоматизации. Для этого создана Государственная система приборов (ГСП). Одновременно с чисто техническими задачами разработки агрегатированных систем решается и проблема ее методологического обеспечения: разрабатываются современные методы нормирования метрологических характеристик системы измерения и управления, методы аттестации и т.д.

Технические средства получения, хранения, обработки и регистрации информации входят в состав различных агрегатированных комплексов ГСП, однако основные приборы и устройства сосредоточены в системе средств контроля и регулирования (АСКР), средств аналитической техники (АСАТ), средств электроизмерительной техники (АСЭТ) и комплексов технических средств для локальных информационно-управляющих систем (КИУС ЛИУС).

#### 2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ

2.1.1. Единицы измерений. Метрологией называется наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Измерение — это нахождение опытным путем техническими средствами значений физических величин. Каждая единица измерения воспроизводится в виде эталона. Совокупность единиц измерения, охватывающая все или только некоторые области измерений (механические, тепловые, электрические и т.д.), называется системой единиц. Общепринятой и обязательной для практического использования в соответствии со стандартом "Единицы физических величин" является Международная система единиц СИ (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Основные единицы системы СИ

Измеряемая величина	Единица измерения	Обозначение
Длина	Метр	м
Масса	Килограмм	кг
Время	Секунда	с
Сила тока	Ампер	А
Температура	Градус Кельвина	К
Сила света	Кандеда	кд

Производными единицами системы СИ являются: единица силы — Ньютон (Н), единица давления — Паскаль (Па), единица энергии — Джоуль (Дж), единица напряжения — Вольт (В) и т.д. (табл.3), причем единицы, названные в честь ученых, пишутся с прописной буквы.

Т а б л и ц а 3. Соотношение единиц некоторых физических величин

Физическая величина	Единица измерения	Соотношение с единицей системы СИ
Сила	кгс	1 кгс = 9,80665 Н
Давление	кгс/см <sup>2</sup>	1 кгс/см <sup>2</sup> = 98066,5 Па
	кгс/м <sup>2</sup>	1 кгс/м <sup>2</sup> = 9,80665 Па
	мм рт.ст.	1 мм рт.ст. = 133,332 Па
Плотность (удельная масса)	г/см <sup>3</sup>	1 г/см <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>
Работа, энергия	Вт.ч	1 Вт.ч = 3,6 · 10 <sup>3</sup> Дж
Температура	°С	°С = T - 273,16
Динамическая вязкость	пуаз	1 пз = 0,1 Па·с
Активность изотопа	Ки	1 Ки = 3,7 · 10 <sup>10</sup> расп/с

Единица длины метр принята равной 1650763,73 длины волн излучения атома криптона 86 в вакууме. Относительная погрешность значения метра составляет  $\pm 1 \cdot 10^{-8}$ . Единица времени секунда определяется 9 192 631 770 периодами излучения атома цезия 133. Относительная погрешность воспроизведения эталона времени составляет  $\pm 1 \cdot 10^{-11}$ .

Единица массы килограмм воспроизводится по прототипу массы - платино-иридиевой гиря. Относительная погрешность воспроизведения единицы массы составляет  $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ . Единица тока - ампер - это сила тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого круглого сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины. На практике ампер воспроизводится с помощью токовых весов.

Единица температуры принята по термодинамической температурной шкале Кельвина. Абсолютная погрешность воспроизведения для тройной точки воды составляет  $\pm 0,0001$  К.

Единица силы света кандела - это сила света, испускаемого с площади  $1/600000$  м<sup>2</sup> сечения излучателя при температуре затвердевания платины (при давлении 0,101325 МПа). Относительная погрешность воспроизведения равна  $\pm 10^{-4}$ .

#### 2.1.2. Характеристика автоматических средств измерения.

По своему назначению меры и измерительные приборы бывают образцовыми и рабочими. Образцовые меры и измерительные приборы служат для воспроизведения и хранения единиц измерения, а также для градуировки и поверки рабочих измерительных устройств. Рабочие меры и измерительные приборы предназначены для прямого или косвенного сравнения измеряемых величин с соответствующими единицами измерения или мерами и разделяются на лабораторные и технические. Лабораторные меры и измерительные приборы характеризуются установленной точностью, и при их применении в результате измерения следует вносить поправки в соответствии с паспортными данными. Для технических мер и измерительных приборов точность принимается заранее заданной, и в результате измерения не требуется вносить какие-либо поправки.

Первой стадией измерения является формирование сигналов измерительной информации с помощью специальных средств измерения, называемых измерительными преобразователями. Под измерительным прибором понимается средство измерения, предназначенное для выработки сигнала в форме, доступной для восприятия наблюдателем. В аналоговых приборах результаты измерений представляются в виде непрерывной функции, в цифровых вырабатываются сигналы в дискретной форме. Измерительные приборы прямого

действия характеризуются преобразованиями сигнала в одном направлении, т.е. без обратных связей. Применение обратных связей характерно для измерительных приборов сравнения, построенных по методу уравнивающего преобразования.

По способу выдачи результатов измерения измерительные приборы могут быть показывающими и самопишущими.

Приборы с устройствами для сигнализации или регулирования величины называются соответственно сигнализирующими или регулирующими.

Статической характеристикой средства измерения называется функциональная зависимость выходного сигнала от измеряемого параметра в установившемся состоянии. Чувствительностью средства измерения называется отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывавшему его изменению измеряемой величины. Минимальное значение измеряемой величины, которое способно вызвать заметное перемещение указателя, называется порогом чувствительности.

При измерении измеряемая величина определяется по номинальному значению мер или по показаниям измерительных приборов. Показания выводятся на основании отсчета, т.е. числа, определяемого по шкале прибора. Переход от отсчета к показанию осуществляется с помощью градуировочной кривой, цены деления или постоянной прибора. Под постоянной прибора понимается число единиц измерения, на которое надо умножить отсчет для получения показания в определенных единицах измерения. Цена деления шкалы численно равна значению измеряемой величины, приходящейся на одно деление. Градуировочная кривая воспроизводит значения измеряемой величины, соответствующие различным отсчетам.

В большинстве измерительных приборов отчетные устройства выполнены в виде шкалы и указателя. Отметки, отвечающие наименьшему и наибольшему значению измеряемой величины, называются началом и концом шкалы и соответствуют нижнему и верхнему пределам измерения, которые определяют диапазон шкалы.

**2.1.3. Погрешности измерений.** Показание измерительного прибора всегда отличается от действительного (истинного) значения измеряемой величины. Это отличие характеризует погрешность измерения. Когда влияющие на процесс измерения величины

находятся в установленных пределах, т.е. имеют место нормальные условия применения измерительного устройства, погрешность измерительного прибора называется основной. Дополнительная погрешность вызывается отклонением параметров за пределы установленных значений.

По способу выражения погрешности делится на абсолютные, относительные и приведенные.

Абсолютной погрешностью измерения называется разность между измеренным и истинным значениями величины:

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x_{\text{ист}}, \quad (2.1)$$

где  $x_{\text{изм}}$ ,  $x_{\text{ист}}$  — измеренное и истинное значение величины соответственно.

Относительная погрешность — это отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины или к показанию измерительного прибора:

$$\delta = \pm \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}} \cdot 100 = \pm \frac{\Delta x}{x_{\text{ист}}} \cdot 100. \quad (2.2)$$

Относительная погрешность выражается в относительных единицах или в процентах, как в формуле (2.2).

Приведенная погрешность — это отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению измеряемой величины, в качестве которого обычно принимается верхний предел измерения или диапазон измерения:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta x}{x_N} \cdot 100, \quad (2.3)$$

где  $x_N$  — нормирующее значение величины.

Обобщенной метрологической характеристикой средств измерения является класс точности, определяемый, как правило, граничными значениями допускаемой погрешности. В частности, класс точности может определяться по относительным или приведенным погрешностям. Нормальный ряд значений классов точности равен  $(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) \times 10^n$ , где  $n = 0; -1, -2$  и т.д.

По происхождению погрешности делится на систематические, промахи и случайные.

Систематическими погрешностями называются такие погрешности, закономерности появления которых известны. Эти погрешности могут быть учтены путем внесения соответствующих поправок.

Премахами, или грубыми ошибками, называются погрешности, существенно превышающие оправдываемые объективными условиями погрешности измерений. Причинами промахов обычно являются ошибки наблюдателя, неисправность измерительной аппаратуры и т.п.

Случайными погрешностями называются неопределенные по своей величине и природе погрешности, в появлении которых не наблюдается какой-либо закономерности. Случайные погрешности можно оценить с помощью аппарата теории вероятности и математической статистики.

Исчерпывающей характеристикой случайных величин является закон распределения. В большинстве случаев случайные погрешности подчиняются нормальному закону распределения, описываемому функцией

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x - x_{\text{ср}}^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad (2.4)$$

где  $f(x)$  — плотность вероятности;  $\sigma_x$  — среднее квадратическое отклонение;  $x$  — текущее значение случайной величины;  $x_{\text{ср}}$  — математическое ожидание (среднее).

Величина  $D = \sigma_x^2$  называется дисперсией.

Нормальный закон распределения характеризуется двумя величинами: математическим ожиданием и среднее квадратическое отклонением. Аналитическое выражение математического ожидания может быть представлено в виде

$$M[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx, \quad (2.5)$$

или при дискретных случайных погрешностях:

$$x_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n x_i p_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.6)$$

где  $p_i$  — вероятность  $x_i$ .



Математическое ожидание характеризует центр рассеяния. Аналитическое выражение среднеквадратического отклонения имеет вид

$$\sigma_x = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - M[x])^2 f(x) dx}, \quad (2.7)$$

или для дискретных величин:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M[x])^2}{n-1}}. \quad (2.8)$$

Среднеквадратическое отклонение характеризует рассеяние случайной величины вокруг центра.

В качестве оценки значения случайной величины используют доверительный интервал с указанием доверительной вероятности  $P$ , т.е. вероятности того, что значения случайной величины не выйдут за названного интервала:

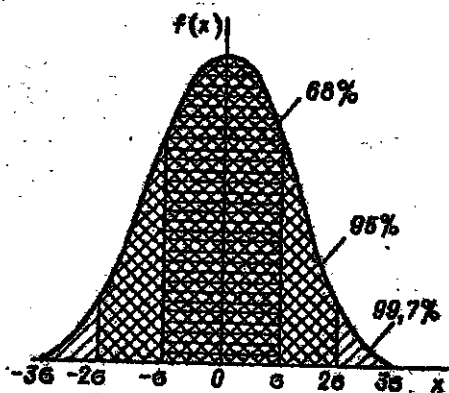


Рис. 39. Геометрическая интерпретация доверительных вероятностей.

$$P\{\alpha < x < \beta\} = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx. \quad (2.9)$$

Для нормального закона распределения доверительные вероятности равны (рис. 39).

$$\begin{aligned} P\{-\sigma < x < +\sigma\} &= 68\%; \\ P\{-2\sigma < x < +2\sigma\} &= 95\%; \\ P\{-3\sigma < x < +3\sigma\} &= 99.7\%. \end{aligned} \quad (2.10)$$

## 2.2. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

**2.2.1. Измерение температуры.** Существуют две основные группы методов и приборов для измерения температуры – контактные и бесконтактные. В первом случае о степени нагретости вещества судят по изменению температурных свойств преобразователя, который предварительно приводится в состояние теплового равновесия с объектом измерения. К бесконтактным преобразователям относятся пирометры излучения, действие которых основано на зависимости лучеиспускания нагретых тел от их температуры, а также специальные измерители. Наибольшее распространение получили следующие серийно выпускаемые приборы для измерения температуры:

- 1) термометры расширения (пределы измерения от  $-190$  до  $+500^{\circ}\text{C}$ );
- 2) манометрические термометры (от  $-160$  до  $+1000^{\circ}\text{C}$ );
- 3) термометры сопротивления (от  $-200$  до  $+750^{\circ}\text{C}$ );
- 4) термоэлектрические термометры (от  $-50$  до  $+1800^{\circ}\text{C}$ );
- 5) пирометры излучения (яркостные, радиационные, оптические и т.п.; от  $100$  до  $10000^{\circ}\text{C}$ ).

**Термометры расширения.** В жидкостных термометрах расширения в качестве рабочих тел служат ртуть, органические жидкости, водно-спиртовые смеси и т.п. Конструктивно жидкостные термометры бывают палочные и с вложенной шкалой. Последние могут быть прямого или углового типа [8, 26, 27].

Для обеспечения позиционного регулирования и сигнализации ртутные термометры могут быть электроконтактными. Контактные устройства бывают либо с заданными значениями срабатывания, либо с подвижным контактом. Изменение настройки в этом случае производится с помощью магнитной муфты. Электроконтактные термометры (табл. 4) могут работать в цепях постоянного или переменного тока.

**Манометрические термометры** (рис. 40) выполняются в виде замкнутой гидравлической системы, давление рабочей среды в которой функционально связано с температурой. Термобаллон 1 соединен с манометром 3, шкала

Т а б л и ц а 4. Технические данные электроконтактных термометров

Тип	Наименование	Число контактов	Пределы установки контактов, °С
ТК-1	Термометр заданного контактирования прямой палочный	2	-5 + + 100
ТК-2	То же угловой	2	100 + 300
ТЭК-П	Термометр заданного контактирования прямой показывающий	1, 2, 3	- 35 + + 300
ТЭК-У	То же угловой	1, 2, 3	- 35 + + 300

которого отградуирована в единицах температуры, капиллярной трубкой 2 с внутренним диаметром 0,2-0,36 мм, защищенной гибким металлическим чехлом. Длина капилляра до 40 м. В зависимости от заполнителя различают следующие типы манометрических термометров: газовые, жидкостные и конденсационные.

Достоинствами манометрических термометров являются прочность, взрывобезопасность, возможность дистанционной передачи показаний. К числу их основных недостатков относятся значительная инерционность, невысокая точность измерения, характеризующаяся погрешностью  $\pm 1 + 2,5\%$ , и сложность ремонта. Поскольку чувствительными элементами в измерительных устройствах манометрических термометров в основном служат одновитковые или многовитковые трубчатые пружины, то вторичные приборы выполняются на базе стандартных манометров. Кроме того, манометрические термометры могут иметь унифициро-

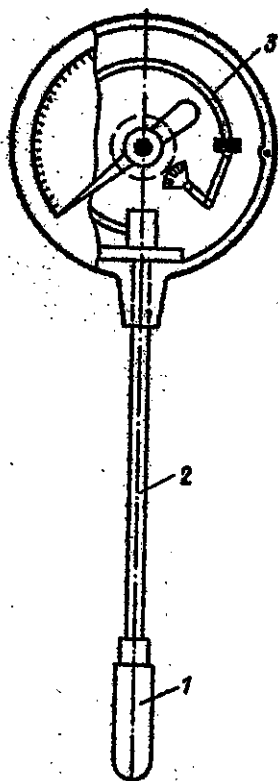


Рис. 40. Манометрический термометр.

ванный пневматический или электрический выход [8, 28, 27].

Типы и характеристики некоторых манометрических термометров с унифицированным выходным сигналом приведены в табл. 5.

Таблица 5. Технические данные манометрических термометров

Тип	Функциональный признак	Пределы измерения, °C	Выходной сигнал
ТНГ-4У	Показывающий	0 + 600	0,02-0,1 МПа
ТНГ-4У	То же	0 + 300	0,02-0,1 МПа
ТНГ-4	" "	0 + 600	0 - 5 мА
ТНГ-4	" "	0 + 300	0 - 5 мА
ТДГ-П	Бесшкальный	0 + 300	0,02-0,1 МПа
ТДГ-П	То же	0 + 300	0,02-0,1 МПа
ТДГ-З	" "	0 + 300	0 - 5 мА
ТДГ-З	" "	0 + 300	0 - 5 мА

Таблица 6. Технические данные термоэлектрических термометров

Тип	Предел измерения, °C	Длина, мм
Хромель-копелевые		
ТХК-0515	600	120 - 2000
ТХК - 0806	600	160 - 3200
Хромель-алюмелевые		
ТХА - 0515	1000	120 - 2000
ТХА - 0806	1000	160 - 3200
Платинородий-платиновые		
ТПП - 0555	1300	320 - 2000

Термоэлектрические термометры (табл. 6). Измерение температуры при помощи термоэлектрических термометров основано на использовании термоэлектрического эффекта, заключающегося в возникновении разности потен-



Рис. 41. Термопара.

циалов в контактном слое соединения двух разнородных металлических проводников (термопаре). При наличии разности температур между рабочим и свободным концом термопары возникает в.д.с., которую можно измерить с помощью прибора (рис. 41) [8].

Свободные концы термопары должны иметь постоянную температуру, так как только тогда измеряемая в.д.с. будет пропорциональна температуре рабочего конца. Для "перемещения" свободных концов в зону с постоянной температурой олу- жат так называемые компенсационные про- вода. В качестве измерительных приборов в комплекте с термоэлектрическими термометрами используются милливольтметры, автоматические потенциометры. В последних компенсация изменений температуры свободных концов осуществляют- ся путем включения в потенциометрическую схему медного тер- мистора, падение напряжения на котором компенсирует раз- балоно потенциометрической схемы за счет изменения температу- ры свободных концов.

**Термометры сопротивления.** Изме- рение температуры с помощью электрических термометров сопро- тивления основано на функциональной зависимости активного со- противления металлических проводников и ряда полупроводнико- вых материалов от температуры. Обычно применяются термометры сопротивления из платины и меди (табл. 7) [8, 26, 27, 41].

Т а б л и ц а 7. Технические данные термометров сопротивления

Тип	Измеряемая среда	Пределы измерения, °C
Платиновые		
ТСП-5071	Жидкость, газ	- 200 + +750
ТСП-6097	То же	- 50 + +250
ТСП-8012	Воздух	- 50 + +110
ТСП-110-01	Поверхность тела	0 + +120

Продолжение табл. 7

Тип	Измеряемая среда	Пределы измерения, °С
Медные		
ТСМ-5074	Жидкость, газ	- 50 + +150
ТСМ-6097	То же	- 50 + +150
ТСМ-8012	Воздух	0 + 50
ТСМ-440-01	Подшипники	0 + 120

Конструктивно термометры сопротивления выполняются из проволоки диаметром 0,04 + 0,1 мм, намотанной на каркас. Чувствительный элемент термометра в сборе помещается в защитный стальной чехол. Термометры сопротивления работают в комплекте с логометрами и автоматическими мостами.

На основе медного термометра сопротивления разработан датчик типа ДТВ-038, предназначенный для непрерывного измерения бесконтактным способом температуры от 30 до 150°C поверхности сушильных цилиндров при скорости бумаги до 1000 м/мин. Датчик укрепляется на штанге с помощью хомута и устанавливается на расстоянии 0,2 - 0,4 мм от поверхности цилиндра.

**2.2.2. Измерение давления.** В зависимости от вида и значения измеряемого давления приборы классифицируются следующим образом:

- 1) барометры (для измерения атмосферного давления);
- 2) манометры (для измерения положительных избыточных давлений);
- 3) микроманометры или напорометры (для измерения положительных избыточных давлений до 5000 Па);
- 4) вакуумметры (для измерения отрицательных избыточных давлений);
- 5) микровакуумметры или тягомеры (для измерения отрицательных избыточных давлений до 5000 Па);
- 6) мановакуумметры (для измерения положительных и отрицательных избыточных давлений);
- 7) тягонапорометры (для измерения положительных и отрицательных давлений до  $\pm 5000$  Па);

8) дифференциальные манометры (для измерения разности давления).

По принципу действия датчики и приборы для измерения давления можно разделить на три группы;

а) приборы, основанные на уравнении измеряемого давления с известным гидростатическим давлением - гравитационные манометры;

б) приборы, основанные на преобразовании упругим чувствительным элементом измеряемого давления в перемещение - пружинные манометры;

в) приборы, основанные на преобразовании измеряемого давления в электрическую величину - электрические манометры.

Т а б л и ц а 8. Приборы для измерения давления [27, 41].

Модификация	Тип		Пределы измерения, МПа
	0,02-0,1 МПа	0-5 МПа	
Манометры			
Сильфонные	МС-П1-9121	МС-31-9521	0+0,16
	МС-П2-9124	МС-32-9524	0+1
Пружинные	МП-П2-9112	МП-32-9512	0+10
	МП-П3-9113	МП-33-9513	0+40
	МП-П4-9114	МП-34-9514	0+100
Вакуумметры			
Сильфонные	ВС-П1-9123	ВС-31-9523	-0,1+0
Мановакуумметры			
Сильфонные	МВС-П1-9121	МВС-31-9521	-0,1+0,9
	МВС-П2-9124	МВС-32-9524	-0,1+2,4
Напоромеры			
Сильфонные	НС-П1-9174	НС-31-9574	0+0,0016
	НС-П2-9175	НС-32-9575	0+0,0063
	НС-П3-9176	НС-33-9576	0+0,04
Тягомеры			
Сильфонные	ТС-П1-9117	ТС-31-9571	-0,0016+0
	ТС-П2-9172	ТС-32-9572	-0,0063+0
	ТС-П3-9173	ТС-33-9573	-0,04+0

Продолжение табл. 8.

Модификация	Тип		Пределы измерения, МПа
	0,02-0,1 МПа	0-5 мА	
Тягонапоромеры			
Сильфонные	ТНС-П1-9174	ТНС-Э1-9574	$(-8+8) \cdot 10^{-4}$
	ТНС-П2-9175	ТНС-Э2-9575	$(-3,15+3,15) \cdot 10^{-3}$
	ТНС-П3-9176	ТНС-Э3-9576	$(-2+2) \cdot 10^{-2}$
Дифманометры			
Мембранные	ДМ-П1	ДМ-Э1	$(1+10) \cdot 10^{-4}$
	ДМ-П2	ДМ-Э2	$(1+6,3) \cdot 10^{-3}$
Сильфонные	ДС-П3	ДС-Э3	$(4+25) \cdot 10^{-3}$
	ДС-П4	ДС-Э4	0,04±0,25
	ДС-П5	ДС-Э5	0,25±0,63

Наибольшее распространение в практике технических измерений получили пружинные приборы (табл. 8). Чувствительным элементом, воспринимающим измеряемое давление, служит манометрический упругий элемент. Последний может быть выполнен в виде полой однонитковой (трубка Бурдона) или многонитковой (геликоид) трубчатой пружины, мембраны (плоской или гофрированной), мембранной коробки, а также в виде сильфона [8, 12, 26, 27].

Манометры с однонитковой трубчатой пружинной недороги, просты по конструкции; технические манометры имеют класс точности 0,6 + 4, образцовые 0,1 + 0,2. Схема манометра с однонитковой трубчатой пружинной приведена на рис. 40. Манометры с трубчатой пружинной бывают показывающие, например типа ОБМ, электроконтактные — ЭКМ, а также с электрическими или пневматическими выходными преобразователями.

Для увеличения чувствительности и выходного перемещения применяют многонитковую трубчатую пружину.

Мембранные приборы применяются для измерения как избыточных давлений и разрежений, так и для перепадов давления. Упругими преобразователями в этих приборах являются мембраны различной конфигурации. Для повышения чувствительности мембранных манометров мембраны соединяют попарно в мембранные



коробки, а коробки — в мембранные блоки. В таких манометрах деформация всего упругого преобразователя возрастает пропорционально количеству мембран.

Для увеличения точности измерения применяются приборы, построенные на компенсационном принципе. К числу таких устройств относятся дифманометры типа ДМ с силовой компенсацией (рис. 42). Разность измеряемых давлений  $P_1$ ,  $P_2$  воспринимается вялой мембраной 1, как показано на схеме, или двумя сообщающимися мембранными коробками. Здесь 2 — шток, 3 — титя, 4 — сильфон, 5, 10 — рычаги, 9 — опора. Перемещение жесткого центра чувствительного элемента деформирует пружину 12, изменяя соответствующим образом положение заслонки 8 относительно сопла 7. Последнее приводит к изменению давления воздуха на выходе пневматического усилителя 8 и в сильфоне обратной связи 11, который компенсирует перемещение заслонки 8 до момента равенства сил на чувствительном элементе.

Принцип действия сильфонных приборов для измерения давления основан на деформации сильфона в осевом направлении

при действии разных давлений внутри и вне его. Благодаря сравнительно большой величине перемещения сильфона такие преобразователи имеют высокую чувствительность.

Для измерения давления применяются также измерительные преобразователи следующих типов: ТЗДМ (для избыточного давле-

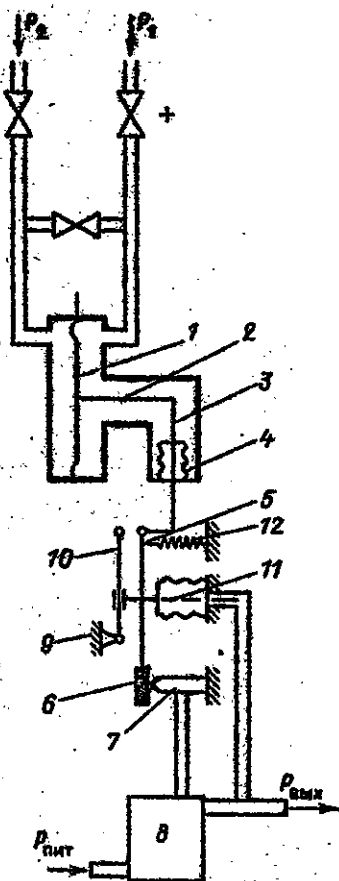


Рис. 42. Мембранный дифманометр.

ния), 13ДА (для абсолютного давления), 13ДВ (для вакуума), 13ДД (для разности давлений) и "Сафир-22".

Установка манометров в целлюлозно-бумажной промышленности связана с рядом мероприятий, направленных на защиту приборов от влияния измеряемой среды. Для предохранения от действия высокой температуры при измерении параметров пара перед манометрами устанавливают конденсационные сосуды типа СКМ-40. При измерении давления агрессивных сред следует предусматривать установку разделительных сосудов типа СРМ-40 или мембранных разделителей типа РМ-5320.

2.2.3. Измерение уровня. По принципу действия уровнемеры делятся на механические, гидростатические и электрические. К механическим уровнемерам относятся:

- 1) водомерные стекла, действующие по принципу сообщающихся сосудов;
- 2) поплавковые и буйковые, основанные на перемещении плавающих поплавков и буйков.

К гидростатическим уровнемерам относятся:

- 1) манометрические, основанные на измерении с помощью манометра или дифманометра давления столба жидкости;
- 2) пневмометрические, действие которых основано на измерении давления воздуха, продуваемого через столб жидкости;
- 3) фланцевые, основанные на измерении давления столба жидкости с помощью мембранного датчика.

К электрическим уровнемерам относятся:

- 1) электроконтактные, основанные на различии электропроводности воздуха и жидкости;
- 2) емкостные, использующие различие диэлектрических свойств воздуха и жидкости;
- 3) фотоэлектрические, в которых используется зависимость интенсивности света от прозрачности;
- 4) радиоактивные, измеряющие уровень по интенсивности поглощения;

5) акустические и ультразвуковые, основанные на свойствах распространения акустических и ультразвуковых волн [8, 12, 26, 27].

Механические уровнемеры. Поплавковые уровнемеры применяются для измерения уровня чистых жидкостей и бумажной массы концентрацией до 1,5% в емкостях без из-

быточного давления. Обычно используются в качестве чувствительных элементов в регуляторах уровня прямого действия, например типа РУКЦ.

**Гидростатические уровнемеры.**  
Гидростатические уровнемеры основаны на измерении высоты столба жидкости  $H$  по давлению  $p$ , которое создает этот столб, в соответствии с выражением  $p = H\rho$ , где  $\rho$  - плот-

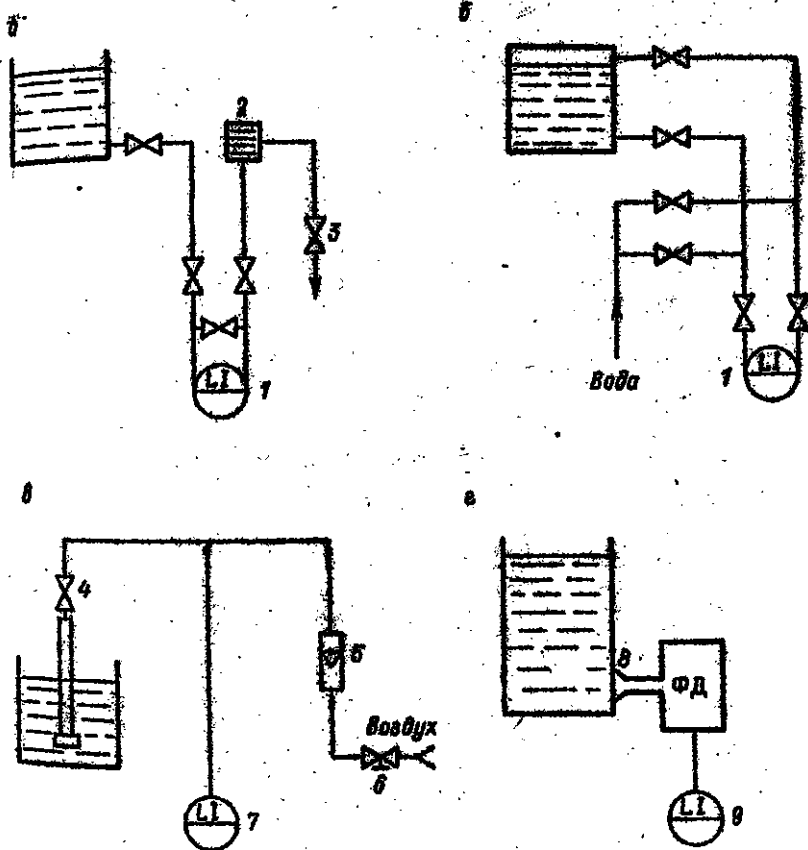


Рис. 43. Гидростатические уровнемеры.

$\alpha, \delta$  - манометрические;  $\alpha$  - для открытого сосуда;  $\delta$  - для сосуда под давлением;  $\beta$  - пневмометрический;  $\epsilon$  - фланцевый.

ность жидкости. Наиболее распространенные схемы гидроstaticеских уровнемеров приведены на рис. 43. Здесь 1 - дифманометр; 2 - уравнительный сосуд; 3 - сливная труба; 4 - пневмометрическая трубка; 5 - ротаметр; 6 - редуктор; 7 - манометр; 8 - мембрана; 9 - вторичный прибор; ФД - фланцевый датчик.

Пневмометрические уровнемеры применяются в емкостях без избыточного давления при концентрации волокнистой суспензии до 5%. Суспензии, имеющие волокнистую структуру, склонны забивать места отборов импульсов для измерения уровня. Поэтому в гидроstaticеских уровнемерах применяется промывка импульсных трубок водой под давлением 0,5-0,7 МПа.

Фланцевые уровнемеры типа 905 имеют пределы измерения 0,4 + 10 м вод.ст. Мембрана датчика, соприкасающаяся с измеряемой средой, изготовляется из кислотостойкой стали, а при необходимости покрывается еще защитной мембраной из титана или фторопласта.

Точность измерения уровня гидроstaticескими уровнемерами равна 1,5 - 2,5%.

**Электрические уровнемеры.** Из электрических уровнемеров в ЦН наиболее распространены электроконтактные, емкостные и радиоактивные. В качестве сигнализаторов уровня применяются электроконтактные реле типа ЭРСУ-2 и емкостные индикаторы уровня, например типа ЗСУ-1М. Действие электроконтактных сигнализаторов основано на замыкании жидкостью электрической цепи между корпусом и измерительным электродом. Питание сигнализаторов низковольтное (24 В). В комплекте с сигнализатором ЭРСУ-2 используется реле МКВ-48 для непрерывного измерения уровня жидких и сыпучих сред. Предназначен емкостный уровнемер ЭИУ-2, в комплект которого входит датчик и вторичный прибор (миллиамперметр). Для непроводящей среды используют неизолированный электрод. Вторым электродом служит корпус емкости. Для проводящих сред применяют электрод, покрытый слоем изоляционного материала. Уровнемер ЭИУ-2 имеет пределы измерения 0-5 м, погрешность  $\pm 2,5\%$ .

Радиоактивные гамма-реле используются в ЦН для сигнализации уровня сыпучих материалов (щепы) и суспензии высокой концентрации. В гамма-реле типов Гр-6 и Гр-7 в качестве ис-

точника излучения применяется кобальт 60 или цезий 137. В блоке источника имеется отверстие, через которое поток гамма-излучения, проходя контролируемую среду, попадает в датчик прибора. В датчике поток гамма-излучения преобразуется в электрический сигнал, поступающий в электронный блок и далее на выходящее реле МКУ-48.

Для измерения уровня щепы в емкостях кроме емкостных и радиоактивных уровнемеров применяются специальные орудства измерения. Применение их обусловлено особыми свойствами щепы, способной образовывать своды, заклипать, слеживаться, зависеть на стенках бункеров. При небольших емкостях уровень их заполнения щепой можно контролировать с помощью тензосметрических массометров типа С-0,5 (1;5;10;50), где цифры обозначают предел измерения в тоннах.

Схема устройства проволоочного тензорезистора представлена на рис. 44. На полосу бумаги 1, называемую подложкой, зигзагообразно наклеивается тонкая проволока 2 диаметром 0,02 - 0,03 мм из констатана, никрома или сплавов. Сверху проволока заклеивается тонкой бумагой 4 для предохранения от механических повреждений. Тензодатчик приклеивается к опорам емкости и воспринимает их деформацию. При этом деформируется и проволока, а следовательно, изменяется ее сопротивление между контактами 3. Тензодатчики работают в комплекте с автоматическими мостами.

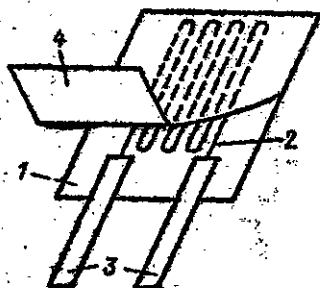


Рис. 44. Проволоочный тензорезистор.

Для сигнализации предельных значений уровня осадка или активного ила в отстойниках очистных станций применяются оптические сигнализаторы СУФ-42 и СУ-101.

Сигнализатор обрабатывает при резком увеличении оптической плотности при переходе от воды к осадку. В комплект сигнализатора СУФ-42 входят: погружной датчик (глубина погружения 3-5 м), усилитель, трансформатор.

Сигнализатор СУ-101 - многоточечный; он допускает подключение до 12 датчиков. Опрос датчиков производится с интер-

вном 20-60 мин. Порог срабатывания 3-5% (по светопропусканию). Глубина погружения датчика 10 м [41].

2.2.4. Измерение расхода. Наиболее распространены при измерении расходов жидкостей, паров и газов расходомеры переменного перепада давления, обтекания, электромагнитные и тепловые [8,12,26,27,41].

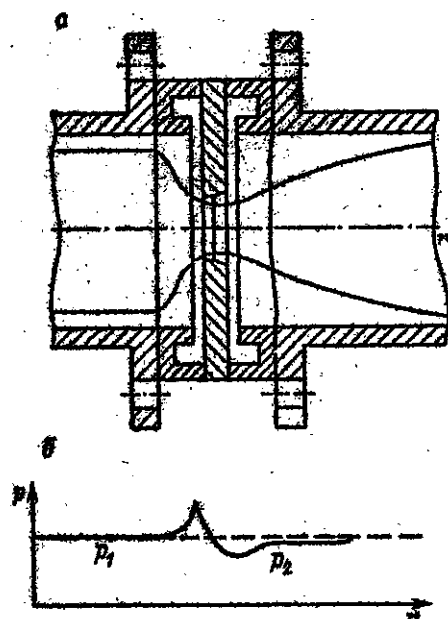


Рис. 45. Схема диафрагмы.

ность среды;  $\Delta p = p_1 - p_2$  - перепад давления (рис. 45).

К стандартным сужающим устройствам относятся стандартные диафрагмы и сопла. Для трубопроводов с внутренним диаметром более 450 мм используются бескамерные дисковые диафрагмы, например типа ДБ 10-450, где 10 - условное давление в кгс/см<sup>2</sup>, 450 - условный диаметр трубопровода в мм. Бескамерные диафрагмы выпускаются на условные давления 0,25; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5 МПа для трубопроводов диаметром 450-1600 мм.

Для трубопроводов диаметром менее 450 мм применяются камерные диафрагмы, например типа ДК6-50. Камерные диафрагмы выпускаются на условное давление 0,6; 2,5; 1,0; 10,0 МПа для

Расходомеры переменного перепада давления широко применяются для измерения расхода жидкостей, газов и паров. Они состоят из сужающего устройства, преобразующего скорость движения вещества в перепад давления, и дифманометра, измеряющего этот перепад давления.

Объемный расход жидкости определяется по формуле

$$Q = \alpha F \sqrt{\frac{2g}{\rho} \Delta p}, \quad (2.11)$$

где  $\alpha$  - коэффициент расхода;  $F$  - проходное сечение диафрагмы;  $\rho$  - плотность среды;  $\Delta p = p_1 - p_2$  - перепад давления (рис. 45).

трубопроводов диаметром 50 + 450 мм. Камеры позволяют исключить влияние местных пульсаций давления.

Сопла Вентури, рассчитанные на диаметры от 50 до 1400 мм и давление до 1,6 МПа, применяются в тех случаях, когда необходимо снизить потери давления, создаваемые диафрагмой.

При измерении расхода загрязненных жидкостей и особенно газов у стандартной диафрагмы, установленной на горизонтальной трубе, могут образоваться отложения. Для избежания этого применяются сегментные диафрагмы.

В комплект измерителя расхода методом переменного перепада кроме сужающего устройства и дифманометра входят вспомогательные устройства (конденсационные и разделительные сосуды), а также интегрирующие приборы, служащие для измерения количества вещества в соответствии с формулой

$$Q_z = \int_{t_1}^{t_2} q_z dt, \quad (2.12)$$

где  $q_z$  - мгновенный расход.

Выбор, расчет и монтаж измерительного комплекта расходомера производится в соответствии с "Правилами измерения расхода жидкостей, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами". Среднеквадратичная погрешность измерения расхода по методу переменного перепада давления колеблется в пределах 0,6 - 3,5%.

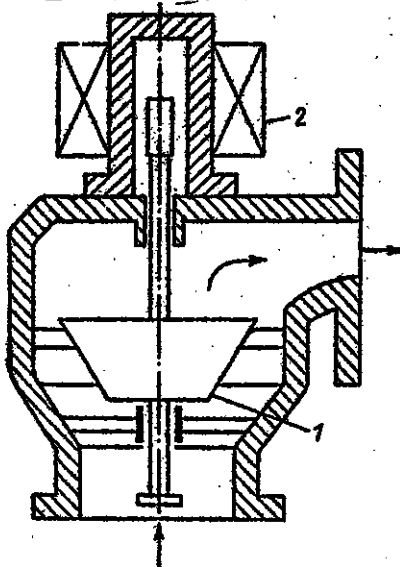
Т а б л и ц а 9. Ротаметры

Наименование	Тип	Предел измерения по воде, м <sup>3</sup> /ч	Рабочее давление, кгс/см <sup>2</sup> (МПа)	Рабочая температура, °С
Ротаметр показывающий отсчитывающий	РС-3А	6,3	6(0,6)	50
	РС-3	36	6(0,6)	50
	РС-5	400	6(0,6)	50
	РС-7	4000	5(0,5)	50
То же для агрессивных жидкостей	РСС-3	16	6(0,6)	50
	РСС-5	400	6(0,6)	50
	РСС-7	3000	5(0,5)	50

Продолжение табл. 9

Наименование	Тип	Предел измерения по воде, $\text{м}^3/\text{ч}$	Рабочее давление, $\text{кгс}/\text{см}^2$ (МПа)	Рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$
Ротаметр показывающий с пневмовыходом, металлический	РП-0,1 КУЗ РП-16 КУЗ	0,1 16	64(6,4)	100
То же, фторопластовый	РПФ-0,1 КУЗ РПФ-16 КУЗ	0,1 2,6	16(1,6)	100
Ротаметр показывающий с пневмовыходом и обогревом корпуса	РПО-0,1 КУЗ РПО-16 КУЗ	0,1 16	16(1,6)	150

Ротаметры (табл. 9). Наибольшее распространение из расходомеров обтекания получили ротаметры, или расходомеры постоянного перепада давления (рис. 46). Изменение высоты под-



ема поплавок 1, которая является мерой расхода, приводит к изменению площади кольцевого зазора между поплавком и трубкой, в результате чего скорость движения среды в зазоре и перепад давления по обе стороны поплавка практически постоянны. Перемещение поплавка преобразуется в электрический сигнал дифференциально-трансформаторным преобразователем 2.

Выпускаются следующие модификации ротаметров (по верхнему пределу измерения расхода жидкости в  $\text{м}^3/\text{ч}$ ): 0,025; 0,04; 0,063; 0,1; 0,16  $\text{МД}^{\text{н}}$ .

Рис. 46. Ротаметр.



где  $n = 0; 1; 3$ . Максимальный расход жидкости, измеряемый ротаметрами,  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ . К числу достоинств ротаметров относятся их высокая чувствительность, возможность измерения малых расходов (от  $0,25 \text{ дм}^3/\text{ч}$  по воде), незначительные потери давления и практически линейная шкала. Погрешность измерения составляет  $\pm 1,5 + 4\%$  [27, 41].

К числу недостатков ротаметров следует отнести сложность градуировки, пригодность их только для чистых сред и отсутствие приборов на расходы выше  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Электромагнитные расходомеры (табл. 40) [8, 12, 27, 41]. Для измерения расхода бумажной массы и загрязненных жидкостей применяются электромагнитные (индукционные) расходомеры (рис. 47). В потоке электропроводной жидкости, движущейся на участке трубопровода 1 из немагнитного материала диаметром  $D$ , между полюсами электромагнита 2, питаемого постоянным или переменным током, возникает э.д.с.  $E$ , величина которой пропорциональна средней скорости движения потока  $v$ :

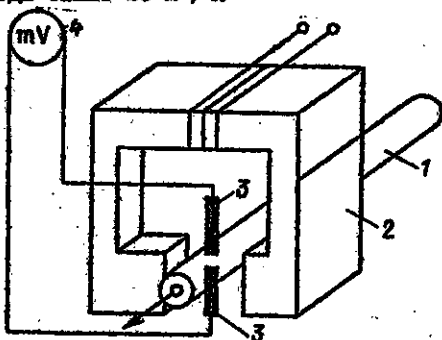


Рис. 47. Электромагнитный расходомер.

где  $B$  — магнитная индукция.

К электродам 3 подключается измерительный прибор 4, шкала которого может быть отградуирована в единицах расхода в соответствии с выражением

$$E = BvD, \quad (2.13)$$

$$Q = Fv = \frac{F}{\pi D} E, \quad (2.14)$$

где  $F$  — сечение трубопровода.

Электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем применяются в основном для измерения пульсирующих потоков или расхода жидких металлов, потому что в этих случаях влияние поляризации и электролиза наименее ощутимо. Для измерения рас-

Жела щелочей, кислот и различного рода пульпы применяются расходомеры с переменным магнитным полем.

Т а б л и ц а 10. Технические данные электромагнитных расходомеров

Характеристика	Тип		
	ИР-51	ИР-51И	4РИ
Основная приведенная погрешность, %	1,0	1,5	1,5
Диаметр трубы преобразователя расхода, мм	10; 15; 25; 50; 80; 100; 150; 200; 300	100; 150; 200; 300	400; 600; 800
Верхние пределы измерения, м <sup>3</sup> /ч	500	500	3200
Материал покрытия	Полиуретан, эмаль Фторлон-4		Резина
Выходной сигнал	Унифицированный: 0 - 5 мА		

Электромагнитные расходомеры отличаются высоким быстродействием и достаточной для практики точностью измерения. На их показания не влияют взвешенные в жидкости частицы или пузырьки газа, а также физико-химические свойства жидкости. Отсутствие внутри датчика выступающих частей и сужений исключает застревание или коагулирование измеряемых продуктов.

Применение отечественных электромагнитных расходомеров ограничивается жидкостями с электропроводностью  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  См/м. Из других недостатков следует отметить сложность градуировки и в условиях ЦНИ — засмоливание электродов.

**Тепловые расходомеры.** Принцип действия тепловых расходомеров основан на зависимости теплообмена от расхода измеряемой среды. Наибольший интерес при реализации данного метода представляют тепловые бесконтактные расходомеры, у которых все рабочие элементы датчика расположены на наружной поверхности трубы и не имеют непосредственного кон-

такта с измеряемой средой (рис. 48). Здесь ПП — первичный преобразователь; ИСП — источник стабилизированного питания цепи нагревателя; ИП — измерительный прибор;  $t_1$ ,  $t_2$  — датчики температуры; 1 — патрубок; 2 — изоляция; 3 — теплоизоляционный кожух;  $R_n$  — сопротивление нагрузки;  $G$  — расход среды.

Достоинством таких расходомеров является возможность измерения агрессивных, токсичных, абразивных потоков в условиях взрывоопасных производств, высоких рабочих температур и давлений. Погрешность измерения равна  $\pm 1 - 3\%$ . Недостатки тепловых расходомеров — это сложность градуировки и инерционность, равная для жидкостей 15–90 с, для газов до 250 с.

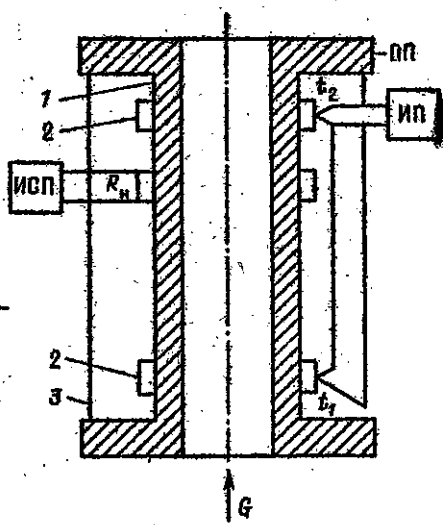


Рис. 48. Тепловой расходомер.

**Счетчики жидкостей.** Счетчики служат для измерения количества вещества. Для измерения количества жидкости применяются объемные и скоростные счетчики. В объемных счетчиках жидкость измеряется отдельными равными по объему дозами. Внутри корпуса счетчика помещается измерительная камера с двумя овальными шестернями, которые находятся друг с другом в зацеплении и при вращении под действием потока измеряемой жидкости непрерывно обкатывают друг друга. Измерение объемного количества жидкости происходит за счет периодического отсекаания определенных ее объемов, заключенных в полости между цилиндрической поверхностью измерительной камеры и овальными поверхностями шестерен. Вращение шестерен передается счетной головке, показывающей количество протекающей через счетчик жидкости. Счетчики жидкости с овальными шестернями применяются для измерения количества

воды, нефтепродуктов и других незагрязненных жидкостей, в том числе агрессивных. Предельный расход  $\sim 70 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Принцип действия скоростных счетчиков основан на суммировании числа оборотов помещенного в поток вращающегося устройства за какой-либо отрезок времени, причем скорость вращения пропорциональна расходу. К скоростным счетчикам относятся водомеры типа ВВ, ВТ с винтовой вертушкой в виде многозаходного винта, расположенной в потоке аксиально, и водомеры типа ВКОС, ВКМС, УВК с крыльчаткой, расположенной тангенциально к потоку. Первые применяются для измерения больших расходов жидкости (до  $850 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), вторые - для измерения малых расходов (до  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

**2.2.5. Измерение состава и свойств жидкостей.** В зависимости от метода анализа приборы для измерения параметров технологических жидкостей делятся на потенциометрические, кондуктометрические, оптические, денометрические и др. [34, 37].

**Потенциометрические приборы.** Потенциометрический метод анализа основан на измерении окислительно-восстановительных (электродных) потенциалов, функционально связанных с концентрацией (активностью) определяемого вещества в растворе. Измеряемый окислительно-восстановительный потенциал отвечает равновесному состоянию, установившемуся на электроде между окисленной и восстановленной формами определяемого вещества, и описывается в общем виде уравнением Нернста:

$$E_{\text{ок/в}} = E_{\text{ок/в}}^0 + \frac{RT}{nF} \ln(a_{\text{ок}}/a_{\text{в}}), \quad (2.15)$$

где  $E_{\text{ок/в}}$  - окислительно-восстановительный потенциал, В;  $E_{\text{ок/в}}^0$  - нормальный (стандартный) потенциал - потенциал электрода, соответствующий равенству активностей ионов  $a_{\text{ок}} = a_{\text{в}}$ , В;  $n$  - число электронов, обмениваемых между окисленной и восстановленной формами вещества;  $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$  - универсальная газовая постоянная;  $T$  - абсолютная температура, К;  $F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$  - число Фарадея. Знак перед вторым членом правой части уравнения соответствует знаку заряда иона.

В потенциометрическом методе для измерения электродного потенциала применяют гальванический элемент, в котором один электрод является измерительным, а другой - электродом сравнения (вспомогательным).

В настоящее время все большее применение для аналитического контроля получают ионоселективные электроды. Эти электроды обратимы по отношению к какому-либо катиону или аниону  $X$ ; их принято обозначать рХ-электродами (рН-электрод, рNa - электрод др.), а потенциометрические анализаторы с соответствующими электродами - рХ-метрами или иономерами.

Автоматический рХ-метр состоит из датчика погружного (ДНг-4М) или проточного (ДМ-5М) типа, в котором смонтированы два электрода (измерительный и электрод сравнения), высокоомного измерительного преобразователя (П-201, П-205), соединенного с датчиком с помощью коаксиального кабеля, и вторичного прибора (миллиамперметра или потенциометра). Преобразователи имеют унифицированный токовый выход 0 - 5 мА и выход по напряжению 0 - 100 мВ.

**Кондуктометрические приборы.** Кондуктометрический метод анализа основан на измерении электрической проводимости (электропроводности) жидкости, зависящей от состава раствора и концентрации. Кондуктометрические анализаторы состоят из трех основных узлов: датчика с кондуктометрической ячейкой, измерительного преобразователя и вторичного прибора. В кондуктометрах применяют измерительные кондуктометрические ячейки различных типов.

Концентраномер кондуктометрический типа КНЧ-1М является стационарным автоматическим бесконтактным прибором и предназначен в зависимости от модификации для непрерывного измерения концентрации растворов, электропроводность которых находится в пределах 0,01 - 1 см/см.

Принцип действия прибора основан на индукционном измерении компенсационным методом сопротивления жидкостного витка, образующегося при погружении чувствительного элемента в контролируемый раствор. Приборы выпускаются с погружным или проточным датчиком. При наличии блока стандартного выхода (0 - 5 мА) прибор может быть использован в качестве датчика для автоматического управления технологическим процессом.

**Оптические приборы.** Оптический метод анализа основан на измерении различных оптических характеристик растворов, зависящих от их состава и концентрации веществ.

Так, например, рефрактометрический метод анализа жидких сред основан на зависимости показателя преломления света анализируемым раствором от его состава.

Автоматический рефрактометр ДЗРП-Д предназначен для измерения показателя преломления прозрачных и полупрозрачных жидких сред и преобразования измеренного значения в унифицированный электрический или пневматический сигнал.

Принцип действия рефрактометра заключается в измерении угла преломления светового луча, проходящего через кюветный преобразователь, представляющий собой жидкостную разностную призму. В комплект прибора входят датчик, измерительный преобразователь, блок питания, нормирующий преобразователь и вторичный прибор.

Анализатор жидкости Анализ-1 является оптическим фотометрическим дисперсионным прибором, использующим избирательное поглощение анализируемой жидкостью в ближней инфракрасной области спектра в диапазоне длин волн 0,75 - 2,5 мкм. Он предназначен в зависимости от модели для определения концентрации различных компонентов в жидких смесях. В комплект анализатора входят блок подготовки жидкости, датчик, блок управления, стабилизатор напряжения и вторичный прибор. Анализатор имеет стандартный выходной сигнал, что позволяет использовать его для автоматического управления технологическим процессом.

**Д е н с и м е т р и ч е с к и е п р и б о р ы .** Денсиметрический метод анализа технологических жидкостей, основанный и эмульсий основан на измерении их плотности. Наибольшее распространение получили весовые (массовые), гидростатические и радиационные плотномеры.

Принцип действия весовых плотномеров основан на измерении массы жидкости, непрерывно протекающей через сосуд фиксированного объема. Одной из разновидностей весовых плотномеров являются поплавокные плотномеры, основанные на измерении выталкивающей силы, действующей на поплавок и пропорциональной плотности анализируемой среды. Поплавокные плотномеры типа ИПР-1М являются автоматическими стационарными приборами непрерывного действия с выходным пневматическим сигналом 0,02 - 0,20 МПа, комплектуются проточным датчиком и предназначены

для измерения и регистрации (записи) плотности некристаллизующихся растворов при температуре 30 - 100°C.

Принцип действия гидростатических плотномеров основан на зависимости давления столба жидкости от плотности. Разновидностью гидростатических плотномеров является плотномер барботажного типа (рис. 49). Он состоит из двух сосудов 1 и 5, в одном из которых находится анализируемая среда, в другом - эталонная жидкость. В трубки 2 и 4 поступает сжатый воздух, трубка 3 является вспомогательной. Перепад давления в трубках 2 и 4, измеряемый с помощью дифманометра 3, равен

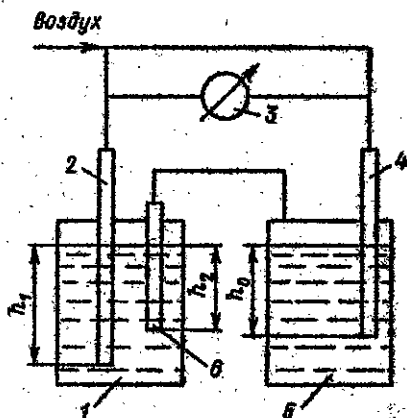


Рис. 49. Схема плотмера барботажного типа.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 10[\rho_1 h_1 - (\rho_0 h_1 + \rho_0 h_2)] = 10[\rho(h_1 - h_2) - \rho_0 h_2], \quad (2.16)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  - давление в трубках 2 и 4, Па;  $\rho$  и  $\rho_0$  - плотности анализируемой и эталонной жидкостей, кг/м<sup>3</sup>;  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_0$  - глубина погружения трубок 2, 4 и 3.

Для измерения плотности жидких сред используют метод, основанный на ослаблении интенсивности гамма-излучения при его прохождении через анализируемую среду. Большая проникающая способность гамма-лучей позволяет проводить измерения с помощью датчиков, непосредственно устанавливаемых на технологических трубопроводах диаметром 0,2 - 0,3 м.

Ослабление интенсивности гамма-излучения, проходящего через слой вещества, подчиняется закону

$$I = I_0 \exp(-\mu L) = I(\rho), \quad (2.17)$$

где  $I$  — интенсивность гамма-излучения на выходе из слоя вещества толщиной  $Z$ ;  $I_0$  — начальная интенсивность излучения;  $\mu$  — линейный коэффициент поглощения, который зависит от энергии излучения и состава (плотности) анализируемой среды.

Промышленный радиоизотопный плотномер ПР-1025М предназначен для бесконтактного непрерывного измерения и регистрации плотности жидких сред и пуль в диапазоне  $500 - 3500 \text{ кг/м}^3$ . В качестве источника излучения используется цезий 137. Основная погрешность прибора не превышает 1,0% от максимального значения плотности.

**2.2.6. Измерение состава и свойств газов.** Для измерения состава газовых смесей применяются различные типы газоанализаторов.

**Термокондуктометрические анализаторы.** Принцип действия термокондуктометрических

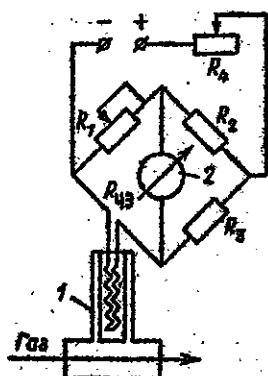


Рис. 50. Термокондуктометрический газоанализатор.

газоанализаторов основан на измерении теплопроводности анализируемой газовой смеси, которая зависит от ее состава. Чувствительный элемент термокондуктометра представляет собой электрическую спираль, на которую подается постоянное напряжение. Сила тока, протекающего через эту спираль, определяется ее сопротивлением, которое зависит от температуры. Температура чувствительного элемента определяется количеством отводимого от него тепла в единицу времени, т.е. теплопроводностью окружающего газа, или составом этого газа. Термокондуктометрический газоанализатор ВКЛ-2 (рис. 50) состоит из рабочей камеры 1, чувствительного элемента с сопротивлением  $R_{cz}$ , мостовой измерительной схемы, образованной сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , корректирующего сопротивления  $R_4$  и вторичного прибора 2.

Любое изменение состава анализируемого газа (а значит, его теплопроводности) нарушает равновесие измерительной схемы, что фиксируется вторичным прибором газоанализатора.



Термомангнитные газоанализаторы. Термомангнитный метод анализа состава газовых смесей основан на способности некоторых газов, обладающих парамагнитными свойствами, к намагничиванию в магнитном поле, т.е. к магнитной восприимчивости. Высокой магнитной восприимчивостью обладает кислород, поэтому термомангнитный метод широко используется для измерения концентрации кислорода в смесях с различными газами.

Принципиально датчик термомангнитного газоанализатора (рис. 51) выполнен по типу термокондуктометрической проточной камеры, которая помещается между полюсами магнита. Анализируемый газ проходит через кольцевую камеру 1. Если в газовой смеси содержится кислород, обладающий магнитной восприимчивостью, то газ втягивается в центральную трубку 3 магнитным полем постоянного магнита 2, нагревается от спирали 4, на которую подается постоянное напряжение и которая выполняет функции термокондуктометрического чувствительного элемента, теряет парамагнитные свойства и выталкивается из трубки в кольцевой канал.

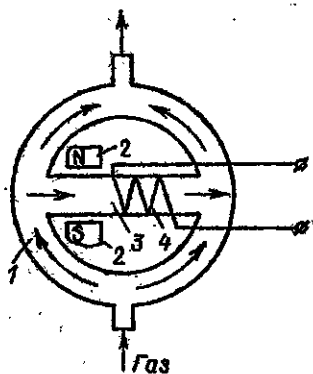


Рис. 51. Термомангнитный газоанализатор.

Термагнитные газоанализаторы типа ГТМК предназначены для определения содержания кислорода в многокомпонентных газовых смесях; пределы измерения 0 - 100% кислорода, основная погрешность не превышает  $\pm 4\%$ , выходной сигнал 0 - 10 мВ.

Оптические газоанализаторы. Принцип действия оптических абсорбционных газоанализаторов основан на измерении оптической плотности газов при пропускании через них светового потока определенной длины волны.

Оптические газоанализаторы состоят из трех основных узлов: блока формирования монохроматического светового потока, проточной термостатированной ячейки и измерительного блока.

Автоматический газоанализатор ультрафиолетового поглощения УФА-1 предназначен для измерения концентрации хлора в раз-

личных средах. Он имеет блочно-модульное исполнение и состоит из узла подготовки газа, термостатированного датчика с измерительным преобразователем и вторичного прибора КСП-4. Газоанализатор имеет пределы измерения 0 - 100% хлора, выходной сигнал 0 - 10 мВ, класс точности 4,0.

Опτικο-акустический газоанализатор ГОА-4, принцип действия которого основан на поглощении инфракрасного излучения, предназначен для определения содержания углекислого газа, окиси углерода, метана и других газов в диапазоне 0 - 20%.

Оптические газоанализаторы могут быть использованы для контроля санитарных характеристик воздуха.

**Газодинамические газоанализаторы.** Принцип действия газодинамических анализаторов основан на измерении динамического эффекта, создаваемого струей газового потока, истекающего с заданной скоростью из специального устройства.

Чувствительный элемент газодинамического газоанализатора "Поток" (рис.52) представляет собой стеклянный баллон 1, в котором соосно расположены и жестко закреплены перемычкой 3 два стеклянных капилляра диаметром 0,3 мм - питающий 2 и приемный 4.

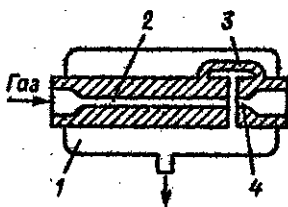


Рис.52. Чувствительный элемент газодинамического газоанализатора "Поток".

Через питающий капилляр непрерывно протекает анализируемый газ, причем перепад давления между входом и выходом капилляра 2 поддерживается постоянным. Истекающий из капилляра 2 газовый поток поступает в приемный капилляр, в котором создается динамический напор тем больший, чем выше кинетическая энергия газового потока.

Газоанализатор "Поток" предназначен для контроля хлороводящих газовых смесей с интервалом изменения концентрации хлора 50 - 100%.

Прибор состоит из узла подготовки газа, датчика, измерительного прибора (дифманометр типа ДМ-П2) и вторичного прибора (типа ПВ). Датчик газоанализатора "Поток" выполнен по двухканальной схеме: по одному каналу движется анализируемый газ, по другому - сравнительный газовый поток (воздух).

Газодинамические анализаторы надежны в работе, просты по конструкции, удобны в обслуживании.

Хроматографы служат для разделения анализируемой смеси на компоненты и определения их концентрации.

Действие хроматографов основано на предварительном разделении составляющих анализируемую смесь компонентов в результате адсорбционных процессов, происходящих при движении смеси вдоль слоя сорбента или за счет различной растворимости компонентов в жидкости. Последующее выделение компонентов и определение их концентрации осуществляется детектором. Выходной электрический импульс детектора передается на прибор, записывающий хроматограмму, состоящую из ряда пиков, каждый из которых соответствует определенному компоненту анализируемой смеси. Площадь пика пропорциональна процентному содержанию компонента в смеси.

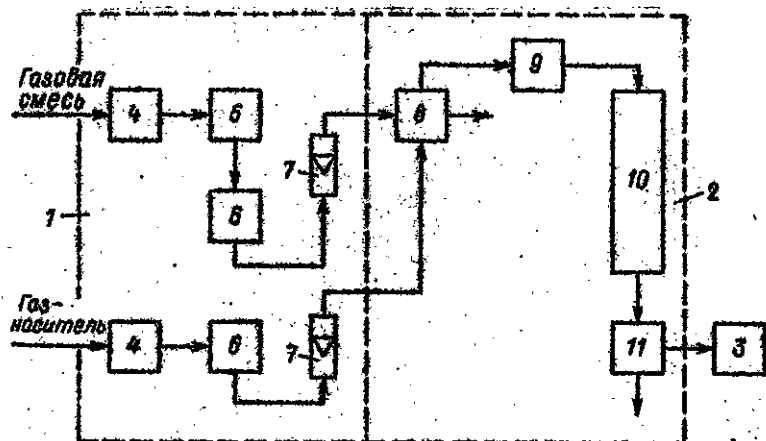


Рис. 53. Блок-схема газового хроматографа.

По принципу действия хроматографы делятся на газовые, газожидкостные и жидкостные.

Газовый хроматограф (рис. 53) состоит из блока подготовки 1, измерительного блока 2 и регистратора 3. В блоке осуществляется фильтрация и очистка исходной газовой смеси фильтром 4, снижение давления газа до требуемого уровня редук-

торами давления 4, а также обеспечивается постоянство расхода газовой смеси и газа-носителя (водорода, азота, гелия или осушенного воздуха) с помощью игольчатых вентилей 6 и ротаметров 7. Дозировка определенных проб осуществляется в измерительном блоке пробосторонним дозирующим устройством 8. Постоянство температуры газа, подаваемого в разделительную колонку 10, обеспечивается регулятором температуры 9. Преобразование изменений состава газовой смеси в электрический или пневматический сигнал осуществляется детектором 11 (термокондуктометрическим, ионизационно-пламенным и др.). В качестве регистраторов обычно используются автоматические электронные потенциометры.

Газовый хроматограф ХП-499 предназначен для анализа смеси углеводородных газов, углеводородов и их изомеров. Пределы измерения 0 - 100% объемных долей, погрешность  $\pm 2,5\%$ , продолжительность цикла не менее 4 мин.

**Измерение влажности газов.** Для автоматического контроля влажности газов обычно используются кулонометрические и пьезосорбционные гигрометры.

Принцип действия кулонометрических гигрометров основан на измерении силы тока между электродами в адсорбционно-электрохимическом чувствительном элементе (кулонометрической ячейке), через который непрерывно, с постоянной скоростью пропускается анализируемый газ. На поверхность электродов нанесен тонкий слой гигроскопического вещества. Сила тока в кулонометрической ячейке эквивалентна количеству водяного пара, сорбируемого из газа в единицу времени.

Пьезосорбционная гигрометрия основана на измерении резонансной частоты колебаний кварцевого пьезоэлемента, покрытого слоем гидрофильного сорбента. Резонансная частота такого чувствительного элемента зависит от его массы, поэтому при оседании молекул воды на поверхность элемента изменяется его резонансная частота. В установившемся режиме разность между собственной и измеренной частотой кварцевого пьезоэлемента зависит от влажности анализируемого газа.

Для автоматического измерения влажности газов наибольшее применение находят гигрометры типа "Волна" с диапазоном измерения относительной влажности воздуха 0 - 100%, гигрометры

"Исток-1" и "Исток-2" с диапазоном измерения абсолютной влажности 0 - 1000 ррш предельных и непредельных углеводородов (метана, этилена, пропилена), хлорорганических веществ (винилхлорида), азота, воздуха, гигрометры "Байкал" для контроля влажности азота и воздуха с диапазоном измерений влажности 0 - 1000 ррш, гигрометры "Корунд-М" для измерения влажности химически агрессивных газов (хлора, диоксида, азота и др.) с диапазоном измерения 0 - 500 ррш ( $1 \text{ ррш} = 10^{-4}\%$ ).

В гигрометрах "Волна" и "Исток" используются пьезосорбционные чувствительные элементы, в гигрометрах "Байкал" и "Корунд-М" - кулонометрические.

Измерение концентрации пыли. Пыль называют дисперсную систему, состоящую из мельчайших твердых частиц, находящихся в газовой среде во взвешенном состоянии.

Методы измерения концентрации пыли делятся на две группы: методы, основанные на предварительном осаждении, и методы без предварительного осаждения.

Главным преимуществом методов первой группы является возможность измерения массовой концентрации пыли. К недостаткам их следует отнести циклический характер измерений, трудоемкость и низкую чувствительность метода. Преимуществами методов второй группы являются: возможность непосредственных измерений в самой пылевоздушной среде, что приводит к упрощению датчика, непрерывность измерений, высокая чувствительность и безынерционность измерений. Влияние изменений свойств пыли на результаты измерения относится к существенным недостаткам этой группы.

В зависимости от области применения пылемеры можно разделить на две группы:

1) пылемеры для контроля запыленности атмосферного воздуха и воздуха производственных помещений;

2) пылемеры для контроля пылевых выбросов; эти приборы предназначены для измерения концентрации пыли в промышленных газопотоках.

Приборы для измерения концентрации пыли в атмосферном воздухе и воздухе производственных

помещений. Для измерения концентрации пыли в атмосферном воздухе и воздухе производственных помещений обычно используются методы, основанные на предварительном осаждении пыли. Наиболее распространенным методом осаждения пыли является фильтрация. Измерение концентрации пыли сводится к отбору предварительной пробы запыленного воздуха, полному улавливанию пыли и определению массы осажженной пыли.

По принципу измерения пылемеры классифицируются следующим образом: весовые, радиоизотопные, оптические, электрические.

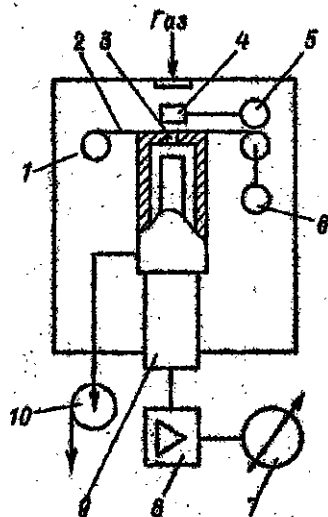


Рис. 54. Пылемер ИЗВ-1.

Принцип действия весовых пылемеров основан на выделении из пылегазового потока частиц пыли и определении их массы путем взвешивания. Для осаждения пыли используется обычно метод фильтрации. На этом методе основан отечественный прибор АЗР-4, предназначенный для горнорудной промышленности. Прибор переносной, взрывобезопасной конструкции, погрешность измерения составляет  $\pm 20\%$ .

Радиоизотопный метод измерения концентрации пыли основан на предварительном осаждении пыли с последующим определением массы осевшей пыли по ослаблению радиоактивного излучения при прохождении его через осадок. Отечествен-

ной промышленностью серийно выпускаются радиоизотопные пылемеры "Приз", ИЗВ-1 и ИЗВ-3. Переносной пылемер "Приз" предназначен для экспресс-анализа концентрации пыли во взрывоопасной атмосфере с целью оперативного контроля. Пылемер ИЗВ-1 предназначен для определения концентрации пыли в атмосферном воздухе и воздухе помещений различных отраслей промышленности.

В пылемере ИЗВ-1 (рис. 54) запыленный воздух проасасывается через фильтр с помощью воздуходушки 10 типа АРВ-ТМ. Пыль

осаждается на фильтровальную ленту 2 типа НЭД-3, которая наматывается на катушку 7. Во время взвешивания пылевого осадка источник  $\alpha$ -излучения 4 устанавливается с помощью механизма 5 над окном 3 газозаборного канала. Излучение, прошедшее через фильтр, регистрируется детектором 9. Выходной сигнал подается на блок 8 и затем прибор 7.

Пылемер ИЗВ-3 в отличие от ИЗВ-1 имеет более широкий интервал измерений и меньшую массу, измерительная часть собрана на интегральных схемах.

Оптические пылемеры основаны на измерении интенсивности света, прошедшего через осадок пыли (принцип фотометрии) или рассеянного осевшей на фильтре пылью (принцип нефелометрии).

Отечественной промышленностью серийно выпускается пылемер ДПВ-1, в котором используется классификатор, разделяющий частицы пыли на две фракции; принцип измерения фотометрический. Разработан опытный образец пылемера ФЭМП-3, основанного на измерении интенсивности света, рассеянного осевшей на фильтре пылью.

Широкое применение нашли счетчики типа АЗ, предназначенные для измерения малых концентраций пыли в воздухе помещений, где требуется высокая чистота (производство электровакuumных, полупроводниковых приборов и др.). Серийно выпускаются счетчики АЗ-2М, АЗ-4, АЗ-5. Измерение числа частиц в рабочем объеме счетчика производится по интенсивности рассеянного света. Счетчик АЗ-2М позволяет измерять концентрации до 25 частиц/см<sup>3</sup> при непрерывном режиме работы, счетчик АЗ-4 измеряет более высокие концентрации пыли (до 250 частиц/см<sup>3</sup>) с размерами частиц от 0,3 до 10 мкм; в отличие от предыдущих счетчиков счетчик АЗ-5 является переносным.

Разрабатываются также счетчики, в которых в качестве источника света используется лазер. Такие счетчики имеют малый рабочий объем, что позволяет регистрировать частицы пыли субмикронных размеров (от 0,05 до 0,5 мкм).

Для регистрации выбросов промышленных предприятий, а также для исследования запыленности атмосферы на больших высотах (до 120 км) разрабатываются лазерные радары - так называемые лидары.

К электрическим пылемерам относятся индукционные, емкостные и пьезоэлектрические пылемеры.

Индукционный пылемер типа ИПИ-1 обеспечивает непрерывный контроль и регистрацию пыли в атмосферном воздухе производственных помещений. Принцип действия его основан на электризации аэрозольных частиц в поле импульсного отрицательного коронного разряда и в последующем измерении их суммарного заряда.

Емкостный измеритель запыленности ТДМ-2 предназначен для контроля запыленности воздуха. Принцип измерения основан на изменении емкости конденсатора при введении частиц пыли между его пластинами. Конденсатор включен в сеть колебательного контура, частота собственных колебаний которого сравнивается с эталонной. О концентрации пыли судят по разности частот.

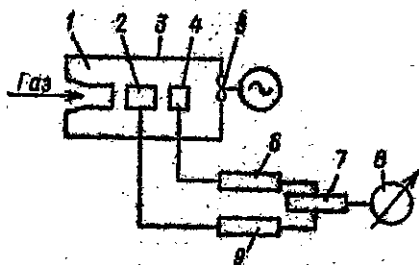


Рис. 55. Пьезоэлектрический пылемер.

Одним из перспективных методов измерения концентрации пыли является пьезоэлектрический метод. Метод измерения основан на изменении частоты колебаний пьезокристалла при осаждении пыли на его поверхности. В пьезоэлектрическом пылемере КДМ-1 (рис. 55) пьезокристалл 2 размещается внутри корпуса 3

навстречу воздушному потоку 1, создаваемому вентилятором 5. Пьезокристалл включен в контур резонатора 4, настроенного на определенную частоту. Компенсационный пьезокристалл 5, изолированный от пылегазового потока, включен в контур резонатора 6 с другой частотой. Выходные колебания обоих резонаторов подаются на блок сравнения 7, выход которого поступает на измерительный прибор 8. При осаждении частиц пыли на измерительный прибор изменение его частоты пропорционально массе осевшей пыли. Для увеличения силы захвата частиц пыли применяются липкие покрытия или электроосаждение.

Приборы для измерения концентрации пыли в газах. Для измере-



ния концентрации пыли в газоходах обычно используют методы без предварительного осаждения пыли. К таким методам относятся весовой, оптический, электрический.

Для предприятий цементной промышленности разработан весовой пылемер ПВ-1. Непрерывно отбираемый запыленный газ поступает в циклон. Осажденная пыль собирается в пылесборнике и периодически пересыпается в чашку автоматических весов, снабженных дифференциально-трансформаторным преобразователем. Выходной сигнал, пропорциональный массе пыли, подается на индикаторное устройство.

К весовым относятся также пылемеры ПВ-2М и ПШ-2.

Оптические пылемеры позволяют непрерывно измерять концентрацию пыли в газоходах без применения пробоотборного устройства. Они устанавливаются непосредственно в газоходах. Из оптических методов наиболее распространен абсорбционный метод, основанный на явлении поглощения света при прохождении его через пылегазовую среду. Для защиты от пыли оптических деталей пылемеров применяют обдувку их чистым воздухом.

Оптический пылемер НИИМ-2 предназначен для непрерывного контроля запыленности отходящих газов мартеновских печей. Прибор состоит из первичного измерительного преобразователя, измерительного блока и регистрирующего прибора.

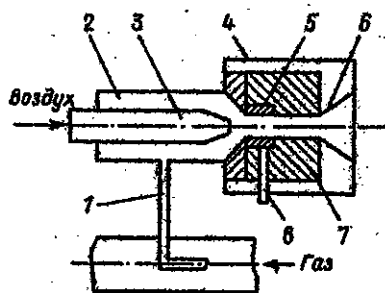


Рис. 56. Контактно-электрический пылемер ПК-1.

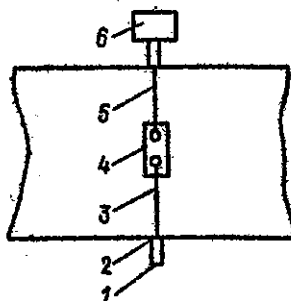


Рис. 57. Пылемер ПК-3.

К оптическим пылемерам относятся также универсальный прибор контроля аэрозолей УЩА-65, предназначенный для автоматического непрерывного контроля запыленности, задымленности и затуманенности промышленных пылегазовых потоков.

Из электрических пылемеров наиболее распространены контактно-электрические. Метод измерения основан на способности пылевых частиц электризоваться при соприкосновении с твердым материалом. Основными элементами пылемера, основанного на контактно-электрическом методе, являются электризатор, где происходит зарядка пылевых частиц, и токосъемный электрод, которому частицы передают свой заряд. При этом сила тока в цепи токосъемного электрода является мерой концентрации пыли.

Отечественные контактно-электрические пылемеры серии ПК-1 (рис. 56) предназначены для контроля запыленности на предприятиях черной металлургии. Частицы пыли, засасываемые камерой 2 из газохода в пробоборную трубку 1, смешиваются в конической части 6 эжектора с потоком сжатого воздуха, поступающего через сопло 3. При этом происходит зарядка частиц при соприкосновении с внутренней поверхностью конуса электризатора 4 и последующая передача заряда токосъемному электроду 5 с изоляционной втулкой 7. Сигнал, пропорциональный суммарному заряду частиц, снимается с клемм 8. Ток электризации регистрируется измерительным прибором.

Недостатком пылемера ПК-1 является оседание влаги на конус электризатора.

Этого недостатка лишен пылемер ПК-2, в котором конус-электризатор и токосъемный электрод не контактируют со сжатым воздухом. Однако вследствие очень высокой скорости (по сравнению с ПК-1) происходит быстрое истирание внутренней поверхности электризатора.

В пылемере ПК-3 в качестве электризатора и токосъемного электрода применена стальная струна, устанавливаемая перпендикулярно пылегазовому потоку внутри газохода и электрически изолированная от него (рис. 57). Диаметр струны 1 — 1,5 мм, длина 1–2 м. Струна состоит из двух частей: собственно струны 3 и растяжки 5. Между ними установлен фарфоровый изолятор 4, имеется устройство натяжения струны 6. Энергия движущихся частиц используется при электризации трением или соударением частиц со струной. Пылемер ПК-3 может быть использован на предприятиях, где скорости движения пылегазового потока достаточны для электризации струны-электризатора. Сигнал снимается с клеммы 1 через изолятор 2.

В пылемере ПК-4 устранены основные недостатки, присущие ПК-2, а именно забивание токоотъемного электрода из-за наличия в пылевидном потоке паров масел и капельной влаги, а также при прекращении подачи в эжектор сжатого воздуха. Кроме того, расширен интервал измеряемых концентраций до  $50 \text{ г/м}^3$ . Пылемер ПК-4 состоит из первичного измерительного преобразователя, блока подготовки сжатого воздуха, измерительного блока и регистрирующего прибора.

## 2.3. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТОЧНЫХ ВОД

2.3.1. Измерение содержания растворенного кислорода и органических загрязнений. Одной из важнейших характеристик сточной воды является содержание растворенного кислорода. Для определения содержания кислорода в промышленных и бытовых сточных водах применяются кислородомеры (например, типа ЭГ-152-003). Содержание кислорода определяется по величине диффузионного тока, возникающего в цепи электродов гальванического элемента при восстановлении кислорода на катоде. Датчики имеют выходной сигнал 0-5 мА и комплектуются электронными автоматическими потенциометрами.

Степень загрязнения сточных вод органическими веществами определяется по количеству кислорода, потребляемого на биохимическое окисление этих веществ до появления нитратов и нитритов. Эта величина называется биохимической потребностью в кислороде (БПК) и является важнейшей характеристикой сточных вод.

Аналитический метод определения БПК очень длительный и трудоемкий. В настоящее время отсутствуют промышленные приборы для прямого определения БПК. Для определения потребления кислорода во времени используются лабораторные приборы-реципрометры. В основе действия приборов лежит зависимость между величиной давления в газовой фазе, находящейся над последующей жидкостью, которая заключена в герметический сосуд, и количеством электроэнергии, затрачиваемой на получение кислорода электролизом. Этот кислород необходим для возмещения кислорода, затраченного на окисление органических веществ, содержащихся в пробе. Запись параметров потребленного кислорода

прибор выдает в виде ступенчатого графика, путем обработки которого получают содержание потребленного кислорода.

Для оценки количества органических загрязнений в сточных и природных водах пользуются и другим показателем — химическим поглощением кислорода (ХПК), определяемым количеством кислорода, израсходованного на окисление содержащихся в воде веществ бихроматом или другими сильными окислителями.

Приборы для определения ХПК представляют собой автоматические или полуавтоматические титрометры, в которых реализуется аналитический бихроматный метод определения ХПК (например, титрометр ПМ-3).

Для измерения мутности сточных вод применяются оптические методы. Например, мутномер М-101 предназначен для определения мутности сточных вод в открытых емкостях и водоемах. Действие прибора основано на непосредственном измерении светового потока, прошедшего через контролируемую среду. Пределы измерения оптической плотности 10 — 100%, основная погрешность не превышает  $\pm 4\%$ .

**2.3.2. Измерение содержания цианидов и хрома.** Сточные воды, загрязненные соединениями циана, хрома и ионами тяжелых металлов, образуются при производстве гальванических металлопокрытий.

Содержание цианидов в сточных водах измеряют потенциометрическим способом. В качестве измерительных электродов применяют серебряный, платиновый, золотой или медный электроды. В качестве вспомогательного электрода используют хлор-серебряный электрод. На основе серебряного алмагированного (покрытого пленкой ртути) электрода разработан сигнализатор заданных концентраций цианидов СЦ-1. Прибор состоит из двух блоков: датчика погружного типа (чувствительный элемент ЗЧПг-1), аналогичного ДПг-4, и преобразователя П-261.

Для измерения содержания хрома в сточных водах обычно применяют также потенциометрический метод. В качестве измерительных электродов используются гладкие пластинчатые электроды из золота или платины, в качестве вспомогательного — стеклянный электрод. На базе этой электродной системы разработан сигнализатор содержания хрома СХ-1, состоящий из датчика ЗЧПг-2, в котором используется золотой электрод, и преоб-

разователя П-261. Конструкцией датчика предусмотрена механическая очистка измерительного и вспомогательного электродов о помощью резиновых кольцевых щеток, приводимых в движение от электродвигателя.

2.3.3. Измерение содержания активного ила. Концентрацию активного ила можно определить по величине поглощения света, проходящего через кивету, наполненную исследуемой жидкостью. Для небольших концентраций в этом случае справедлив закон Бугера - Ламберта - Бера:

$$I = I_0 \exp(-Acl), \quad (2.18)$$

где  $I_0$  и  $I$  - интенсивности светового потока на входе в слой вещества толщиной  $l$  и на выходе из него;  $A$  - постоянная, зависящая от свойств жидкости и частоты света;  $c$  - концентрация вещества.

Обычно приборы измеряют оптическую плотность, определяемую уравнением

$$D = -\lg \frac{I}{I_0} = Acl. \quad (2.19)$$

Для измерения концентрации активного ила применяются фотометры (например, ФОН), состоящие из датчика оптической плотности выносного типа со сменными киветами и измерительного блока. Фотометр работает в инфракрасной области спектра, что позволяет исключить влияние цветности жидкости на оптическую плотность.

Одним из самых перспективных косвенных показателей процесса биохимической очистки сточных вод является окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), или редокс-потенциал (ОН). Установлено, что ход процесса биохимической очистки сточных вод зависит от соотношений между количествами растворенного кислорода (окислителя), растворенных и диспергированных органических веществ (восстановителей) и ферментов, которые продуцируются бактериями (катализаторов). ОВП позволяет косвенно определить эти соотношения.

В некоторых случаях обнаружена прямая связь ОВП с некоторыми технологическими показателями (содержанием кислорода, БПК и др.).

Величину ОВП измеряют с помощью электродной системы. В качестве измерительных электродов используют платиновый, золотой или специальный стеклянный электрод ЭО-01. Достоинство последнего заключается в том, что он не реагирует на присутствующий в воде растворенный кислород. В случае применения золотого электрода можно использовать электродную систему датчика ЭЧПг-2. В качестве вспомогательного электрода используют хлорсеребряный электрод. Чувствительные элементы работают в комплекте с преобразователями рН-261 и П-261.

2.3.4. Измерение свойств осветленной воды. Основными показателями качества осветленной воды служат количество растворенного кислорода, мутность и цветность, а для питьевой воды — также содержание фтора и хлора.

Измерение содержания растворенного кислорода. Для измерения содержания растворенного кислорода в природной воде применяется кислородомер ЭГ-152-002, принцип действия которого такой же, как кислородомера ЭГ-152-003. Пределы измерения 0-30 мг/дм<sup>3</sup>, основная погрешность  $\pm 6\%$ , выходной сигнал датчика 0 - 5 мА. В качестве вторичного прибора используется электронный автоматический потенциометр.

Измерение мутности. Автоматический турбидиметр ТВ-346 предназначен для определения мутности воды в системах водоподготовки и водоочистки. В комплект турбидиметра входят датчик ДИФА и электронный автоматический мост. Диапазон измерения 0-500 мг/дм<sup>3</sup>, основная погрешность  $\pm 2\%$ .

Измерение цветности. Цветомер ЦВ-201 служит для измерения цветности воды в системах обработки на водопроводных станциях. Действие прибора основано на измерении относительной оптической плотности контролируемой воды в коротковолновой области видимого спектра (400-440 нм) по отношению к оптической плотности в длинноволновой области спектра (600-680 нм). Это позволяет исключить влияние мутности на показания прибора, так как абсорбция света водой, вызванная мутностью, происходит в двух каналах, а абсорбция, вызванная цветностью, — только в измерительном канале. Прибор комплектуется электронным автоматическим мостом КСМ-2. Пределы измерения 0-100%, основная погрешность  $\pm 5\%$ .

Измерение содержания фтора. Фотоколориметрический анализатор АФ-297 служит для определения содержания фтора в питьевой воде на водопроводных станциях. Принцип действия основан на измерении интенсивности окраски смеси контролируемой воды с индикатором. В качестве фотометрического блока используется датчик ДИФАТ. Прибор комплектуется электронным автоматическим мостом. Пределы измерения 0 - 3,5 мг/дм<sup>3</sup>, основная погрешность  $\pm 0,1$  мг/дм<sup>3</sup>.

Измерение содержания хлора. Для автоматического контроля хлорирования питьевой воды на водопроводных станциях служит деполяризационный анализатор АПК-ОЛМИ. Действие его основано на измерении напряжения, создаваемого током, который протекает в цепи электролита, вследствие деполяризации свободным хлором положительного электрода электродной ячейки. Степень деполяризации зависит от количества хлора в воде и скорости протекания через ячейку воды. В комплект входят: датчик, электронный автоматический потенциометр КСП-2 и дублирующий электронный мост. Пределы измерения 0-3 мг/дм<sup>3</sup>, основная погрешность  $\pm 4\%$ .

## 2.4. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕЛЛЮЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

К специальным параметрам ЦПН относятся концентрация волокнистой суспензии, влажность и масса 1 м<sup>2</sup> бумажного и картонного полотна, качественные показатели волокнистой суспензии (белизна и степень помола), качественные показатели бумаги (просвет, воздухопроницаемость, непрозрачность, гладкость).

2.4.1. Измерение концентрации волокнистой суспензии. Бумажная, древесная и целлюлозная масса представляют собой водную суспензию волокнистых материалов. Основной ее характеристикой является концентрация, т.е. содержание в ней абсолютно сухого волокна в массовых процентах.

Можно выделить следующие диапазоны применяемых концентраций (%): размол стуженной суспензии при производстве древесной массы из щепы в современных размалывающих установках - 15 - 30; обычные непрерывные методы размола - 3 - 12; процессы дозирования и составления композиции - 2 - 3,5; процессы сортирования

и подачи массы на плоскосеточные и круглосеточные машины, осветление оборотных вод - 0,04 - 1,5; очистка оборотных сточных вод - 0,003 - 0,15.

Таким образом, в различных технологических процессах приходится контролировать концентрации от 0,003 до 30%.

Как известно, непосредственно измерить концентрацию, т.е. содержание абсолютно сухого волокна в единице объема, возможно только в лабораторных условиях. Измерение концентрации проб массы в лабораторных условиях производят путем их фильтрации, сушки и взвешивания. Для непрерывного измерения концентрации применяют датчики, принцип действия которых основан на косвенных методах измерения. Все эти методы имеют существенные ограничения по пределам измерения концентрации.

Применение косвенных методов связано с дополнительными погрешностями измерений из-за влияния различных побочных факторов: температуры, давления, скорости потока, степени помола.

Измерение средних концентраций. Для измерения средних концентраций от 1,5 до 5% применяются датчики, принцип действия которых основан на гидродинамических (реологических) свойствах волокнистой суспензии.

При рассмотрении движения по трубопроводам различают ньютоновские жидкости, скорость движения по трубопроводу которых линейно зависит от приложенной силы сдвига, вязкопластические и псевдопластические жидкости, скорость движения которых по трубопроводу имеет нелинейную зависимость от приложенной силы сдвига.

Приблизительно можно считать, что волокнистая суспензия имеет свойства вязкопластических и псевдопластических жидкостей, так как не учитывается наличие волокнистой упругой объемной структуры. Такая структура образуется при движении суспензии с концентрацией более 0,8% из-за переплетения волокон друг с другом. При практически применяемых концентрациях суспензия в диаметрах трубопроводов волокнистая суспензия обладает свойствами псевдопластической жидкости с показателем потока  $n \approx 0,2$ , что соответствует "поршнеобразному" характеру распределения скоростей по сечению.

При малой скорости движения трение волокон о стенку трубопровода больше трения между слоями, поэтому у стенок су-



суспензия неподвижна. При повышении скорости трение между слоями волокон возрастает и при скорости более 0,3–0,6 м/с делается больше, чем трение волокон о стенку трубопровода. Суспензия начинает двигаться "поршнем" без относительного сдвига слоев, скользя вдоль стенок. При этом в пограничном слое стенка – "поршень" образуется водяное кольцо. При концентрации суспензии 2,5–4% и скорости движения 0,6 – 1,5 м/с толщина водяного кольца составляет сотые доли миллиметра. При скорости потока суспензии более 2 м/с движение становится турбулентным, захватывая сперва водяное кольцо, а затем все сечение трубопровода, приводя к разрушению волокнистой структуры.

Изменение температуры суспензии оказывается на величине вязкости воды. При малой скорости и концентрации колебания температуры оказывают большее влияние на характер движения массы, чем изменение концентрации.

Датчики, основанные на измерении сопротивления движению суспензии. Известно, что концентрация суспензии определяет потери напора в трубопроводе, по которому она движется. Величина сопротивления движению волокнистой суспензии по трубопроводу может явиться мерой концентрации в ней волокна. По этому принципу построены датчики, в которых суспензия из приемного кармана с переливом сливается по наклонному лотку в возвратный трубопровод. Уровень в лотке определяется скоростью движения в нем суспензии, которая в свою очередь при данном наклоне лотка зависит от концентрации суспензии. Для измерения уровня в лотке может применяться поплавок с механической передачей или пневмометрическая трубка [8, 12, 26].

Пределы измерения датчика меняются углом наклона лотка и расходом через него суспензии, причем чем выше измеряемая концентрация, тем больше должен быть угол наклона лотка.

В датчике с трубкой сопротивления измерительным элементом является воронка, в которую подается суспензия через калиброванное отверстие из выпускного отсека с постоянным уровнем. Выход суспензии из воронки осуществляется через изогнутую трубку трения. Потери напора в этой трубке и устанавливающийся уровень суспензии в воронке определяют концентрацией волокна в протекающей суспензии. Для измерения уровня

используется уровнемер (пневмометрическая трубка), что позволяет применять стандартные пневматические приборы.

В системе измерения концентрации, основанной на измерении потери напора  $\Delta p$  на участке массопровода, концентрация может быть подсчитана по формуле:

$$C = \frac{2.5}{\sqrt{\frac{\Delta p D}{K F v^{0.75}}}}, \quad (2.20)$$

где  $C$  — концентрация суспензии;  $K$  — постоянная трубопровода;  $F$  — постоянный коэффициент, зависящий от вида суспензии, величины  $pH$  и температуры;  $v$  — скорость движения суспензии;  $D$  — диаметр трубопровода.

Для измерения концентрации суспензии этим методом с достаточной точностью необходимо поддерживать постоянный расход суспензии через мерный трубопровод, постоянную температуру и степень помола суспензии.

Роторные датчики для открытых сосудов. Датчики роторного типа основаны на измерении поверхностного трения суспензии. В этом случае разность скоростей между суспензией и соприкасающейся с ней поверхностью создается вращением погруженного в суспензию тела (насадки) той или иной формы. В качестве насадок применяют ребристый конус у датчика ДКП-63 и ДКМ-62. Число оборотов насадки у датчиков не более 400 об/мин, поэтому их окружная скорость по отношению к суспензии мала из-за малых размеров насадки и колеблется от 1,5 до 0,3 м/с, т.е. находится в области до образования водяного слоя. Сопротивление вращению ротора, измеряемое этими датчиками, определяется возникающей силой трения ротора непосредственно о суспензию. Форма поверхности насадки так же влияет на сопротивление: например, наличие на ней ребер увеличивает чувствительность датчика.

Достаточная точность показаний датчиков концентрации роторного типа может быть обеспечена только при малых колебаниях температуры и степени помола.

Линейная зависимость момента  $M$  ротора от концентрации  $C$  имеет место при концентрации более 1,5%. Устойчивое измерение этими датчиками можно проводить в пределах от 1,5 до 5%. Погрешность измерения не превышает  $\pm 0,03\%$ .

Датчики концентрации ДКП-63 и ДКЕМ-62 применяются для измерения концентрации волокнистой суспензии в пределах от 0,5 до 5%. Датчик ДКП-63 (рис. 58) состоит из приемного бака 1 и собственно датчика 2. Суспензия с расходом  $0,5 \pm 0,1 \text{ м}^3/\text{мин}$  поступает во внутренний стакан приемного бака для создания постоянного уровня и обтекает погруженную в этот стакан конусную насадку. Чувствительный элемент приводится во вращение со скоростью 75 об/мин синхронным электродвигателем. Реактивный вращающий момент, возникающий вследствие трения насадки о суспензию и стремящийся повернуть статор двигателя, передается на рычаг пневмопреобразователя. Поворот этого рычага изменяет положение заслонки относительно сопла. Выходной стандартный пневматический сигнал, пропорциональный измеряемой концентрации, подается на выход прибора. Чем глубже погружен конус, тем больше поверхность соприкосновения с суспензией, тем более низкую концентрацию можно измерить.

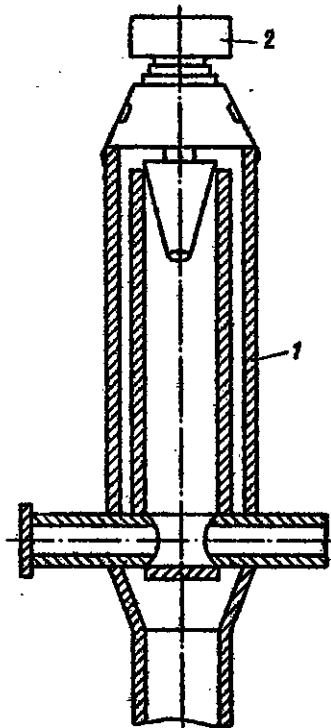


Рис. 58. Датчик концентрации ДКП-63.

Датчик ДКЕМ-62 регулятора концентрации РКЕМ-62 отличается от датчика ДКП-63 тем, что имеет не пневматический, а дифференциально-трансформаторный преобразователь со стандартным электрическим выходом.

**Роторные датчики для напорных линий.** Роторные датчики для напорных линий измеряют поверхностное трение волокнистых суспензий о ротор, зависящее от скорости суспензии. Эти датчики монтируются непосредственно в массопроводах, работающих под давлением. Для полного исключе-

ния влияния скорости течения чувствительные элементы стали устанавливаться в местных расширениях трубопроводов, где скорость снижается до минимума. Чувствительные элементы различных конструкций и видов располагаются в специальном расширении трубопровода (ниже) как параллельно, так и перпендикулярно потоку суспензии.

Достоинством этих датчиков является возможность применения для каждого вида суспензии чувствительного элемента особой формы, что обеспечивает максимальную чувствительность измерения. На показания датчиков влияют изменения температуры, степени помола, состава суспензии и содержания в ней наполнителей.

Датчики быстро и точно реагируют на флуктуации концентрации. В области нормальных скоростей потоков они нечувствительны к флуктуациям давления и скорости потока. Они могут устанавливаться вблизи смесительных насосов в трубопроводах. Диапазон измерения концентрации 0,8-8%. Благодаря массивной конструкции датчики могут применяться также для измерения концентрации несортированной волокнистой суспензии.

**Д а т ч и к и   о т к а н и я   д л я   н а п о р н ы х   л и н и й .** Если погрузить в поток волокнистой суспензии какое-либо неподвижное тело, например стержень, то на него будут действовать сила, разрывающая волокнистую структуру "поршня" движущейся суспензии, и сила поверхностного трения о поверхность тела, которые зависят от концентрации суспензии. Кроме того, на чувствительный элемент действуют скоростной напор, зависящий от скорости потока, и тянущие силы, возникающие при ходе потока о чувствительного элемента.

Таким образом, равнодействующая сила, действующая на погруженный в массопровод чувствительный элемент, зависит от концентрации суспензии и скорости потока. Поэтому форма чувствительного элемента должна быть такой, чтобы максимально сократить влияние составляющей скоростного напора.

В качестве чувствительных элементов для этих датчиков используются: гибкий стержень или "палец", датчик типа "палец", согнутый стержень.

Датчик измеряет усилие, которое стремится изогнуть палец, поднять "палец", преобразовывая его в стандартный пневмати-

ческий или электрический выходной сигнал с использованием элементов обычных преобразователей. Все эти датчики не имеют компенсации скоростного напора и поэтому действующие на них условия зависят не только от концентрации, но и от скорости потока. Для ослабления этого влияния датчики при скорости более 1,2 м/с устанавливаются в специальных расширениях трубопроводов. Для исключения завихрений и повышения чувствительности датчика за счет увеличения составляющей, связанной с поверхностным трением, которое резко возрастает из-за увеличения боковых поверхностей чувствительного элемента, стали применять датчики типа "ятаган" или "хоккейная клюшка". Этот датчик имеет специальный хвостовик, служащий для компенсации вязких сил. Граница применения этих датчиков ограничена скоростями потока более 0,6 м/с, чтобы на гранях не образовывался водяной слой. Передняя грань чувствительного элемента должна быть тупой. При острой передней грани происходит простое обтекание лопатки суспензией без изменения ее скорости. Оптимальная толщина передней грани от 6 до 8 мм.

Под действием приложенной к чувствительному элементу результирующей силы рычаг, на котором крепится чувствительный элемент, перемещается и свое перемещение передает преобразующему устройству.

Датчики обтекания применяются для измерения концентрации суспензии в пределах от 1 до 5% в напорных трубопроводах диаметром не менее 150 мм при давлении до 0,6 МПа, температуре до 95°C и скорости потока от 0,2 до 3 м/с. Примером таких датчиков могут быть датчики типа

АМК-Э1 (НПО "Гауя"), ДКБП-70А (НПО "Булават"), рис. 59.

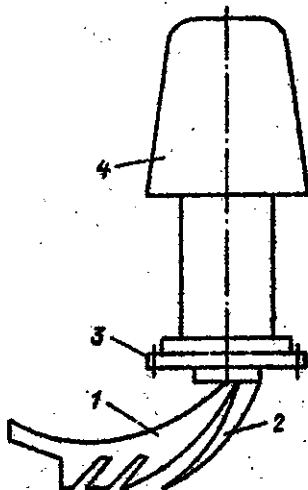


Рис. 59. Датчик концентрации ДКБП-70А.

Датчик ДКН-70А отличается тем, что его чувствительный элемент 1 имеет два косых среза, как бы три передние грани. Это повышает чувствительность датчика. Перед чувствительным элементом установлен отражатель скоростного напора 2. Датчик крепится к трубопроводу при помощи фланца 3. Изгибающий момент, действующий на чувствительный элемент, преобразуется в пневмосигнал с помощью пневмопреобразователя 4. На результаты определения концентрации по измерению трения и усилия сдвига влияют многие факторы: температура, содержание воздуха и наполнителей, вид полуфабриката и состояние волокон (степень помола, взаимодействие между волокнами и т.д.), скорость течения. Температура влияет на вязкость воды, эластичность и трение волокон, поэтому изменение температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  может вызывать изменение сигнала датчика примерно на 0,2%.

Погрешность измерения при постоянстве композиции (состава); степени помола и температуры составляет  $\pm 0,05\%$  концентрации, и дополнительная погрешность при четырехкратном изменении скорости суспензии по трубопроводу -  $\pm 0,025\%$ .

Измерение низких концентраций. Существующие способы измерения средних концентраций не пригодны для измерения низких концентраций волокна ввиду большой погрешности при флуктуациях температуры, плотности и других факторов. Между тем точное измерение низких концентраций волокна приобретает особое значение при освоении производства самых тонких видов бумаг. Концентрация подсеточных, оборотных и сточных вод является не только показателем количества промывов, но и важной характеристикой состояния волокнистой суспензии на сетке. В настоящее время для контроля низких концентраций волокна применяются способы, основанные на свойстве волокнистой суспензии деполяризовать линейно поляризованный свет.

Разработан датчик (рис. 60), позволяющий измерять самые низкие концентрации волокна, причем показания его не зависят от температуры, pH, изменения интенсивности и цвета красителей, нестабильности источника света. Датчик предназначен для измерения концентрации непосредственно перед напуском волокнистой массы, а также концентрации волокна в подсеточной, оборотной и сточной воде [8].

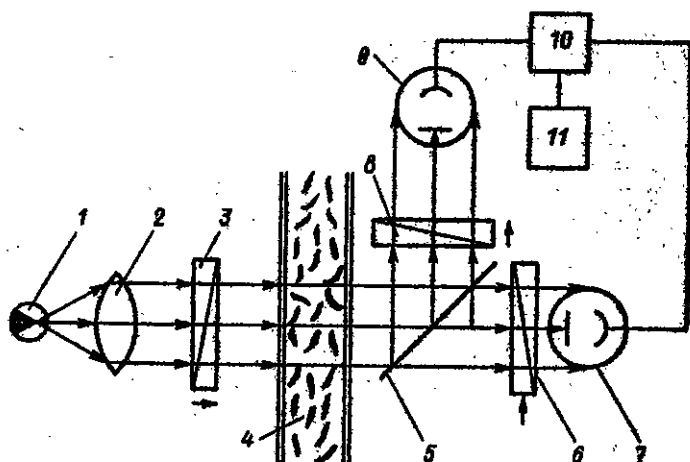


Рис. 60. Оптическая схема датчика низких концентраций.

Анализ света, прошедшего через суспензию, показал, что линейно поляризованный свет, взаимодействуя с суспензией целлюлозы, превращается в частично линейно поляризованный свет. Как известно, целлюлозные волокна обладают двойным лучепреломлением. Хаотическая ориентация волокон относительно плоскости поляризации линейно поляризованного света обеспечивает суспензии свойство деполаризовать поляризованный свет. В качестве сигнала, пропорционального концентрации волокон в суспензии, в датчике выбрано поляризационное отношение.

Свет от источника 1 фокусируется с помощью линзы 2 в параллельный пучок и через поляризатор 3 направляется в кювету с контролируемой суспензией 4. Прошедший суспензию пучок света разделяется полупрозрачным зеркалом 5 по двум каналам, в которых помещены анализаторы 6 и 8. Свет обоих каналов поступает на фотоэлементы 7, 9. Электрические сигналы их поступают в аналоговый блок 10, выполняющий операцию деления. Результат деления поступает на измерительный прибор 11 и является сигналом, пропорциональным концентрации волокон в суспензии.

Отличительной особенностью разработанной схемы является наличие анализаторов в обоих сравнительных каналах, причем

плоскость поляризации одного анализатора совпадает с плоскостью поляризации поляризатора 3, а плоскость поляризации другого анализатора перпендикулярна ей.

Оптическая схема датчика положена в основу прибора для измерения концентрации волокна в сточных водах бумажной фабрики. Диапазон измеряемых концентраций лежит в пределах от 0 до 2 г/дм<sup>3</sup>.

**Приборы инфракрасного излучения.** Концентраномер бумажной массы (КЕМ) устанавливается преимущественно перед напорным ящиком бумагоделательной машины. Принцип действия прибора основан на использовании избирательных свойств целлюлозы диффузно отражать инфракрасное излучение. Диапазон измерения концентрации 0,1 – 0,6%, основная погрешность измерения до  $\pm 0,05\%$ ; выходной сигнал 0–5 мА [8, 26].

Прибор состоит из первичного преобразователя (датчика) и измерителя. Кроме этого он комплектуется стабилизатором напряжения и при необходимости самопишущим прибором типа КПЗ-П230. Датчик формирует световой сигнал и преобразует его в электрический с амплитудой, пропорциональной величине рассеянного волокнами целлюлозы излучения, который по кабелю поступает в измеритель. Конструктивно датчик выполнен в виде самостоятельного блока, на одной из сторон его имеется цилиндрический выступ с двумя рабочими окнами, соприкасающимися с контролируемой средой при установке датчика на трубопроводе или других емкостях, в которых необходимо измерять концентрацию бумажной массы.

Измеритель предназначен для обработки сигналов датчика и выдачи стандартных сигналов и состоит из блока питания и измерительного блока. Блок питания обеспечивает необходимыми напряжениями датчик и измерительный блок.

Измерительный блок преобразует сигнал в стандартный, а также с помощью приборов позволяет визуально наблюдать за изменением концентрации.

Левый прибор показывает значение измеряемой концентрации (с помощью градуировочной характеристики), а правый – отклонения от заданной концентрации. Допустимый диапазон отклонения концентрации устанавливается на приборе, и при выходе за



установленный предел прибор выдает световой сигнал, показывающий отклонение в большую или меньшую сторону.

Датчик может быть удален от измерителя на 15 м.

#### 2.4.2. Измерение степени помола волокнистой суспензии.

В основу разработки конструкции прибора первичной информации о степени помола может быть положена зависимость степени помола бумажной массы от количества воды, отфильтрованной за определенный интервал времени при постоянном гидростатическом давлении. Установлены зоны наибольшей чувствительности, выбраны оптимальные режимы работы устройства и изготовлена установка для контроля степени помола бумажной массы в технологическом потоке КСП-А1 (рис. 61) [8, 26, 41].

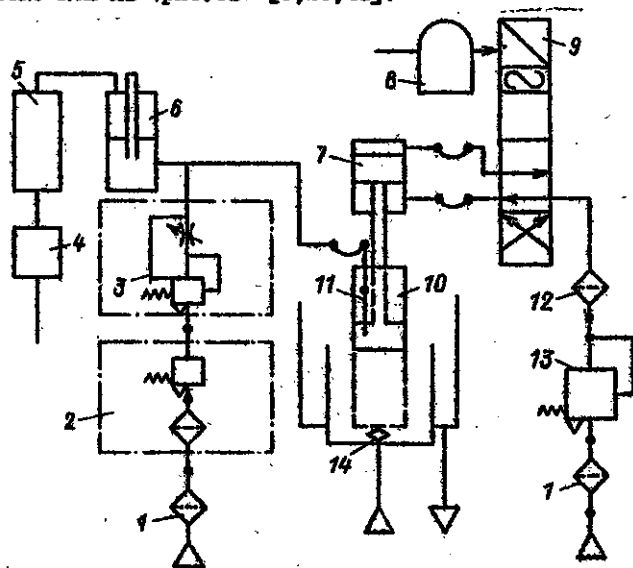


Рис. 61. Схема установки для измерения степени помола бумажной массы КСП-А1.

Принцип действия установки следующий. Бумажная масса из трубопровода подается в переливное устройство 14 и затем, переливаясь через его стенки, поступает на слив в смесительную станцию или бассейн. Через заранее заданные интервалы времени в зону контроля переливного устройства при помощи пневмоцилиндра 7 на определенную глубину погружается датчик 10, со-

здавая перепад уровней, и фильтрат направляется через сетку в датчик. Пневмоцилиндр приводится в движение от воздуха распределителя 9, воздух в который поступает от пневмосети через воздушный фильтр 1, дроссель 13 и маслораспылитель 12. Интенсивность поступления фильтрата в датчик фиксируется пневмосистемой, состоящей из барботажной трубки 11, дифманометра 8 и автоматического самопишущего дифференциально-трансформаторного прибора 5. Пневмосистема питается от сети скачкового воздуха через воздушный фильтр, дроссель 2 и регулятор расхода воздуха 3.

При погружении датчика в зону контроля переливного устройства в его полости начинает подниматься уровень фильтрата. При достижении определенного уровня срабатывает левый микропереключатель автоматического самопишущего дифференциально-трансформаторного прибора и включается механизм перемещения каретки печатающего устройства показывающего и регистрирующего прибора 4. С увеличением уровня фильтрата в датчике срабатывает правый микропереключатель, отключается перемещение каретки печатающего устройства и выключается механизм печати. Так как каретка печатающего устройства перемещается с постоянной скоростью, расстояние от начала шкалы до точки печати характеризует степень помола бумажной массы. Каретка связана зубчатыми колесами с осью блока гальванометра, механозлектрического преобразователя, превращающего угол поворота оси 0-30° в унифицированный электрический сигнал 0-5 мА. После отработки программы, задаваемой реле времени 6, датчик возвращается в исходное положение, при этом фильтрат вытекает из датчика через сетку, промывая ее. Все элементы установки, кроме преобразователя, приходят в исходное положение.

Установка снабжена устройством, позволяющим преобразователю сохранять выходной сигнал до следующего определения степени помола бумажной массы. Она выдает унифицированный сигнал (0-5 мА) для автоматического регулирования процесса размола волокнистой массы при производстве бумаги и картона и передает информацию о степени ее помола на электронно-вычислительные машины для выбора наиболее оптимальных режимов работы. Эта установка для измерения степени помола имеет

дополнительную погрешность измерения вследствие изменения температуры массы.

Для устранения этой погрешности и повышения точности измерения в установку для измерения степени помола вводится коррекция по температуре (рис. 62). Установка работает следующим образом. Массу подают в емкость 1, куда периодически опускается датчик 2 при помощи пневмопривода, представляющего собой пневмоцилиндр 4, приводимый в действие от воздухораспределителя 5, управляемого программным задатчиком 6. При опускании датчика в емкость волокнистая масса фильтруется через сетку 3. Уровень фильтрата является координатным показателем степени помола [8].

Система измерения и регистрации уровня фильтрата включает в себя пневмотрубку 7, дифференциальный манометр 8 и регистрирующий прибор 9. Питание измерительной линии пневмотрубки осуществляется сжатым воздухом через приборы очистки и подготовки, включая фильтр воздуха 10, дроссель 11 и регулятор расхода воздуха 12. При отсутствии коррекции по температуре выходной сигнал снимается с преобразователя 13 выходного сигнала с элементом памяти. Последнее необходимо для сохранения неизменным измеренного значения степени помола в период между циклом измерения и вспомогательными циклами. Вспомогательные циклы - это

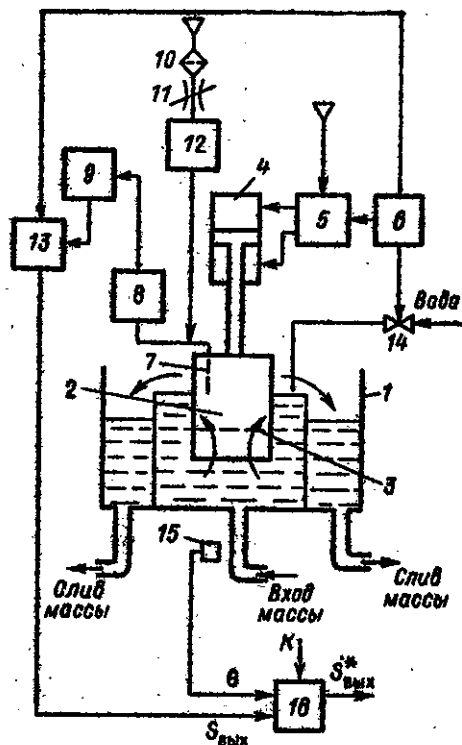


Рис. 62. Схема установки для измерения степени помола бумажной массы с коррекцией по температуре.

цикл подъема чувствительного элемента и цикл промывки сетки. Длительность циклов задается задатчиком, воздействующим на пневмоцилиндр, преобразователь выходного сигнала и клапан 14 проточной воды.

Система измерения температуры бумажной массы состоит из измерителя температуры 15, соединенного со входом пересчетного блока 16, второй вход которого соединен с выходом преобразователя выходного сигнала.

Пересчетный блок производит вычисление степени помола при 20°C ( $\Delta_{\text{вых}}^*$ ) по формуле

$$\Delta_{\text{вых}}^* = \frac{\Delta_{\text{вых}}}{1 - K(\theta - 20)}, \quad (2.21)$$

где  $K$  — коэффициент, равный 0,005 для сульфитной беленой и сульфатной небеленой целлюлозы; для других видов целлюлозы значения  $K$  может быть определено экспериментально путем обработки результатов измерений степени помола массы при 20°C и при другой температуре;  $\Delta_{\text{вых}}$  — степень помола бумажной массы при текущем значении температуры;  $\theta$  — текущее значение температуры массы, °C.

Величина  $K$  вводится как константа в пересчетный блок.

Общим выходным сигналом прибора является сигнал  $\Delta_{\text{вых}}^*$  на выходе пересчетного блока. С его помощью исключается температурная погрешность результатов измерения степени помола.

**2.4.3. Измерение влажности бумажного и картонного полотна.** Автоматический контроль влажности полотна непосредственно на бумагоделательных и картоноделательных машинах осуществляется с помощью координатных методов, основанных на зависимости между влажностью полотна и другими его свойствами.

Наиболее распространены следующие типы влагомеров:

1) кондуктометрические, основанные на зависимости активного сопротивления отрезка бумажного полотна между электродами от влажности полотна;

2) емкостные, основанные на зависимости диэлектрической проницаемости бумажного полотна от его влажности;

3) сверхвысокой частоты (СВЧ), основанные на использовании энергии электромагнитных волн СВЧ-диапазона (см) и измерении поглощения или отражения этой энергии бумажным полотном;

4) инфракрасные (ИК), основанные на использовании энергии ИК-лучей (мкм) и измерении отражения или поглощения этих лучей бумажным полотном;

5) ядерного магнитного резонанса (ЯМР), сущность которого заключается в резонансном поглощении радиоволн ядрами водорода, входящими в состав воды [8, 11, 26].

Диэлькометрический способ измерения влажности основан на измерении диэлькометрических характеристик бумаги — диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ . Изменение  $\epsilon$  при изменении влажности обусловлено тем, что  $\epsilon_w$  воды во много раз превышает  $\epsilon$  сухого вещества и воздуха.

Диэлькометрические влагомеры измеряют параметры емкостного измерительного преобразователя с полотном в электрическом поле. Электрическая схема емкостного влагомера с полотном представляет собой параллельное соединение активного сопротивления  $R$  и емкости  $C$ . Параметры схемы  $R$  и  $C$  зависят от электрических характеристик материала: диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , удельного электрического сопротивления  $\rho$ , формы, расположения и размеров электродов:

$$R = K \rho, \quad (2.22)$$

$$C = \frac{1}{K} \epsilon_0 \epsilon, \quad (2.23)$$

где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная;  $K$  — постоянная электродов.

На рассматриваемом принципе измерения влажности основана работа отечественного влагомера типа "Роса", структурная схема которого приведена на рис. 63. Емкостный датчик 4, непосредственно соприкасающийся с полотном бумаги 5, подключен к измерительному контуру 3. Сигнал разности напряжений от связанных контуров 2, 3, пропорциональный влажности полотна с выхода устройства сравнения 6, поступает в усилитель постоянного тока, который состоит из транзисторного модулятора 7, предварительного 8 и выходного 9 усилителей переменного тока и демодулятора 10. Модулятор и демодулятор

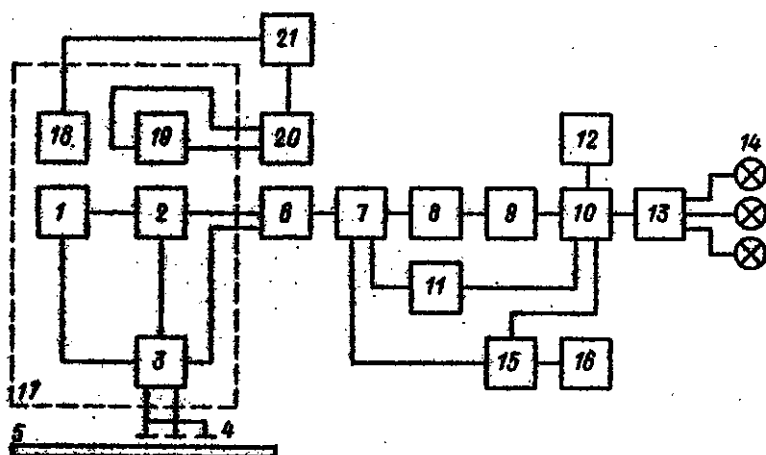


Рис. 63. Структурная схема влагомера "Роса-1".

питаются от опорного генератора 11. К демодулятору подключается измерительный прибор 12, отградуированный в процентах влажности, и система предупредительной сигнализации 13, 14 нарушения допусков влажности. С выхода демодулятора сигнал постоянного тока подается на выходной усилитель 9, обеспечивающий выходной сигнал постоянного тока 0-5 мА, контролируемый миллиамперметром 10. Генератор 1 высокой частоты и связанные контуры 2, 3, которые питаются от генератора, помещены в термостат 17, в котором поддерживается постоянная температура 50°C при помощи подогревателя 18, блока питания 21, датчика температуры 19 и терморегулятора 20.

#### Технические данные влагомера "Роса-1"

Диапазон измерения влажности при массе  
 $1 \text{ м}^2$  40 - 400 г, % ..... 2 - 12  
 Основная погрешность измерения, %...  $\pm 0,5$   
 Дополнительная погрешность измерения, %!  
 за счет изменения массы  $1 \text{ м}^2$  от  $\pm 5$  до  
 $\pm 16\%$  на каждый процент.....  $\pm 0,1$

за счет отклонения относительной влажности окружающей среды на 10%... не более 0,2  
 Время нагрева, мин ..... 30

СВЧ-влажномеры используют зависимость электрических свойств бумаги от влажности в диапазоне сверхвысоких частот, в частности эффект ослабления мощности проходящей или отраженной волны СВЧ в зависимости от влажности.

На рис.64 приведена структурная схема промышленного СВЧ-влажномера [11]. Генератор 2 вырабатывает СВЧ-колебания, которые после модуляции по амплитуде низкочастотным модулятором 1 сверхвысоких частот поступают по волноводу в опорную и измерительную СВЧ-ветви. Первая

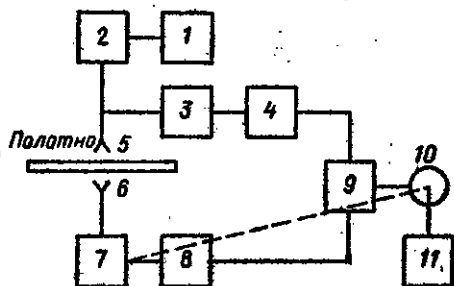


Рис.64. Структурная схема СВЧ-влажномера.

состоит из аттенуатора 3 и детектора 4. В измерительной волновой ветви СВЧ-колебания направляются через рупорную антенну 5 на поверхность полотна и поступают в приемную антенну 6. Затем энергия СВЧ через аттенуатор 7 поступает к детектору 8. Низкочастотные сигналы с детекторов подаются на дифференциальный усилитель 9, а сигнал рассогласования - на реверсивный двигатель 10, который поворачивает уравновешивающий аттенуатор 7 измерительного волновода до выравнивания сигналов и перемещает движок реохорда и указатель прибора 11.

Промышленный СВЧ-влажномер рассмотренного типа позволяет измерять влажность от 5 до 10% с абсолютной погрешностью не более  $\pm 0,1\%$ .

ИК-влажномеры. На рис.65 приведена структурная схема ИК-влажномера [11]. Источником излучения является лампа накаливания 1. Свет проходит через вращающийся диск 2 с оптическими узкополосными фильтрами 3. На систему зеркал 4 и бумагу 9 он попадает импульсами инфракрасного

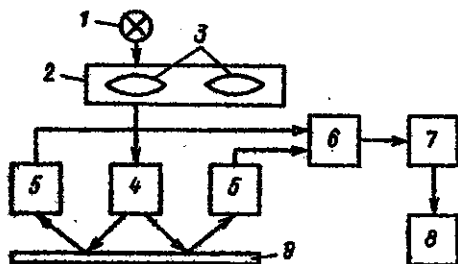


Рис. 66. Структурная схема ИК-влажномера.

излучения двух длин волн. Отраженный свет проходит через систему фильтров, один из которых пропускает излучение, поглощаемое молекулами воды, а второй пропускает излучение, не поглощаемое молекулами воды. Излучение после фильтров собирается сферическим зеркалом 5 и с помощью

детектора 6 преобразуется в электрические колебания, регистрируемые после усилителя 7 измерительным устройством 8. Интенсивность излучения, поглощаемого водой, характеризует влажность полотна. Оба потока излучения зависят от характеристики бумажной массы, т.е. показания прибора не зависят от изменения толщины полотна, его композиции и массы  $1 \text{ м}^2$ .

Приборы для измерения влажности фирмы Zentrol Systems. Датчик "Инфрамайт III" может быть использован в производстве всех сортов бумаги и легкого картона в качестве ИК-влажномера, работающего по принципу отражения. Точность прибора  $\pm 0,2\% \text{ H}_2\text{O}$ . Источником инфракрасных лучей является вольфрамовая лампочка. ИК-лучи проходят через линзу и вращающийся диск и далее по волноводу на бумажное полотно. Отражаемое излучение собирается интегрирующей сферой, на стенке которой установлена ячейка из сульфида оловца. В ячейке инфракрасное излучение преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный интенсивности излучения. В фильтрующем диске имеется два фильтра, один из которых пропускает лучи с длиной волны  $1,84 \text{ мкм}$ . Интенсивность этого потока лучей зависит от влажности полотна. Другой поток лучей с эталонной длиной волн  $1,81 \text{ мкм}$  не зависит от влажности.

Использование датчика дало хорошие результаты при измерении влажности особо тонкой бумаги. Измеряющая способность датчика резко уменьшается при увеличении массы свыше  $100 \text{ г/м}^2$ .



Для измерения влажности бумаги большой массы, картона и полотна целлюлозы используются датчики "Гигатель-IX" и "Гигатель-XI", принцип работы которых основан на сильном поглощении водой микроволн частотой 22 ГГц - ротационном резонансе молекул воды. Микроволны частотой 22 ГГц поглощаются водой приблизительно в 100 раз сильнее, чем целлюлозой.

При измерении с помощью датчика "Гигатель-IX" осуществляется односторонний контакт с полотном. Измерительной головкой прибора служит волновод, одной из стенок которого является бумажное полотно. Микроволны вводятся волноводом и частично поглощаются водой в полотне. Количество энергии на выходе сравнивается с количеством энергии на входе - разность этих величин указывает на количество воды в полотне. "Гигатель-XI" производит измерение без контакта с полотном и применением прежде всего в мокрой части машины или для измерения влажности целлюлозы после сушильной части. Верхний диапазон измерения влажности составляет 70% [11].

2.4.4. Измерение массы 1 м<sup>2</sup> бумажного и картонного полотна. Наиболее распространенными приборами для автоматического контроля массы 1 м<sup>2</sup> полотна непосредственно на бумаго- и картоноделательных машинах являются радиоизотопные приборы (табл. 11). Радиоизотопный метод измерения массы 1 м<sup>2</sup> полотна основан на функциональной зависимости

$$I = f(G), \quad (2.24)$$

где  $I$  - интенсивность потока  $\beta$ -частиц, прошедшего через материал;  $G$  - масса 1-м<sup>2</sup> материала.

В этом случае зависимость  $I = f(G)$  имеет вид

$$I = I_0 e^{-\mu z}, \quad (2.25)$$

где  $I_0$  - интенсивность  $\beta$ -излучения до прохождения через измеряемый материал;  $\mu$  - коэффициент ослабления излучения в материале, зависящий от энергии излучения и свойств материала;  $z$  - толщина измеряемого материала.

Произведение  $\mu z$  для определенного материала и при определенной энергии излучения характеризует массу 1 м<sup>2</sup> данного материала.

Таблица 11. Технические данные массометров

Характеристика	Тип			
	РВЕ-2	РРВ-64	РВТБ	ВЕМ-1
Диапазон измерения, г/м <sup>2</sup>	40-1000	20-450	4-40	40-800
Постоянная времени, с	-	10	-	10
Максимальная ширина измеряемого полотна, мм	2000	3200	2520	6720
Скорость сканирования, м/мин	3,0	3,0	3,0	2-5,2
Выходной сигнал	-	0-5 мА	-	0-5 мА 0,02-0,1 МПа

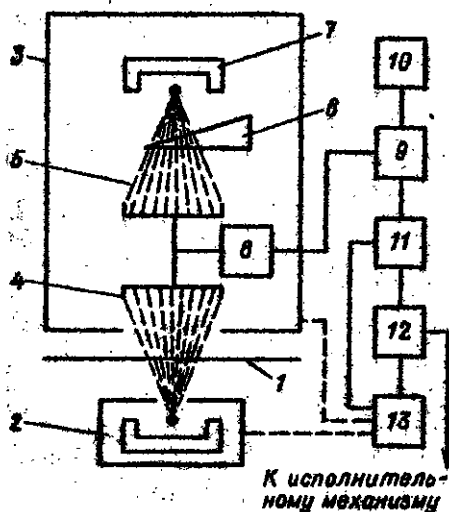


Рис. 66. Блок-схема регулятора массы 1 м<sup>2</sup> типа РРВ-64.

Рассмотрим в качестве примера устройство наиболее распространенного радиоактивного регулятора массы 1 м<sup>2</sup> типа РРВ-64 (рис. 66). Бумажное полотно 1, проходит в зазоре между камерой рабочего источника излучения 2 и измерительной головкой 3, перекрывает поток радиоактивного излучения, воздействующий на рабочую ионизационную камеру 4, в результате чего величина ионизационного тока в ней меняется с изменением массы бумаги. Степень поглощения опре-

деляется компенсационной ионизационной камерой 5. Величина ионизационного тока в ней устанавливается постоянной для данной номинальной массы бумаги с помощью задатчика 6, перекры-

вакуумного потока излучения от камеры компенсационного источника излучения 7. Собирающие электроды камер подключены к нагрузочному сопротивлению в электрометрическом каскаде 8, где происходит преобразование и предварительное усиление равноостного тока, снимаемого с электродов. Сигнал от электрометрического каскада поступает в фазочувствительный усилитель 9, к выходу которого подключены автоматический потенциометр 10 и через блок управления 11 пропорционально-импульсный регулирующий блок 12, воздействующий на исполнительный механизм. Камера рабочего источника 2 и измерительная головка 3 находятся на специальном устройстве для перемещения датчика 13, управляемом блоком 11 [8,12,26,41].

Существенным недостатком влагомеров и массометров полотна является то, что на показания измерителя влажности влияет колебания массы  $1 \text{ м}^2$  и, наоборот, колебания влажности - на показания измерителя массы  $1 \text{ м}^2$ . Это взаимное влияние можно исключить с помощью связанного измерения, при котором показания влагомера используются для введения в измеритель массы  $1 \text{ м}^2$  коррекции по содержанию влаги, а показания датчика массы  $1 \text{ м}^2$  бумажного полотна вводятся во влагомер для автоматической корректировки влажности. Таким образом, задача сводится к синхронному измерению массы и влажности полотна и решению системы уравнений

$$\alpha = f_1(m, p), \quad (2.26)$$

$$\beta = f_2(m, p), \quad (2.27)$$

где  $\alpha$  - выходной сигнал влагомера;  $\beta$  - выходной сигнал массометра;  $m$  - влажность бумажного полотна;  $p$  - масса  $1 \text{ м}^2$  бумажного полотна.

Синхронизация сигналов обеспечивается путем установки датчика влагомера и массометра на одной подающей каретке сканирующего устройства.

Кроме повышения точности измерения массы  $1 \text{ м}^2$  и влажности полотна применение комбинированных приборов дает возможность вычислить профиль массы  $1 \text{ м}^2$  полотна в поперечном направлении и среднее значение массы  $1 \text{ м}^2$  полотна в продольном направлении. В отечественном комбинированном приборе типа

ЭМ-1 в качестве влагомера использован прибор типа "Роса", а массомера - датчик типа РРВ-64. Обычно системы связанного измерения массы  $1\text{ м}^2$  и влажности бумажного полотна реализуются с использованием ЭМ.

## 2.5. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПОКАЗЫВАЮЩИЕ И РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

Пневматические приборы имеют следующие преимущества: простота схем и аппаратуры, надежность работы, взрыво- и пожаробезопасность. Благодаря этим преимуществам пневматические приборы широко используются в химической, целлюлозно-бумажной и других отраслях промышленности. Рассмотрим основные типы и назначение пневматических вторичных приборов.

### Показывающие приборы

ИПВ 1.1	- показания одного параметра;
ИПВ 1.1К	- то же, но с корневым преобразователем;
ИПВ 1.1И	- показания одного параметра и индикация крайних установленных значений параметра;
ИПВ 1.2	- показания одного параметра;
ИПВ 1.2К	- то же, но с корневым преобразователем;
ИПВ 1.3	- показания одного параметра;
ИПВ 1.3К	- то же, но с корневым преобразователем;
ИПВ 1.3И	- показания одного параметра и индикация крайних установленных значений параметра;
ИВ 1.3	- показания одного параметра;
ИПВ 1.4	- показания и работа дистанционного задатчика;
ИПВ 1.4И	- то же и индикация крайних значений задания;
ИПВ 1.5	- показания и работа дистанционного задатчика;
ИПВ 1.5И	- то же и индикация крайних установленных значений для задания;
ИВ 2.2	- показания и пневматическая сигнализация отклонений параметра от заданных крайних значений;
ИПВ 2.3	- показания, работа сигнализации и задатчика;
ИВ 3.2	- показания и станция управления; имеет три шкалы: регулируемого параметра, задания и сигнала на входе исполнительного механизма.

# Самопишущие приборы с приводом диаграммы от электродвигателя

- РПВ 4.1З - запись и показания одного параметра;
- РПВ 4.1КЗ - то же, но с корневым преобразователем;
- РПВ 4.2КЗ - то же;
- РПВ 4.2З - запись и показания одного параметра;
- ПВ 4.2З - то же;
- ПВ 4.3З - запись двух параметров и показания одного из них;
- РПВ 4.3З - то же;
- РПВ 4.3КЗ - то же, но с корневым преобразователем;
- РПВ 4.5З - запись и показания первого параметра, запись второго и показания третьего параметров;
- РПВ 4.5КЗ - то же, но с корневым преобразователем;
- ПВ 10.1З - запись и показания регулируемого параметра, показания задания и сигнала на входе исполнительного механизма; имеет станцию управления.

Аналогичные самопишущие приборы с приводом диаграммы от пневмодвигателя имеют в обозначении индекс П вместо З. Различные модификации приборов отличаются некоторыми конструктивными особенностями.

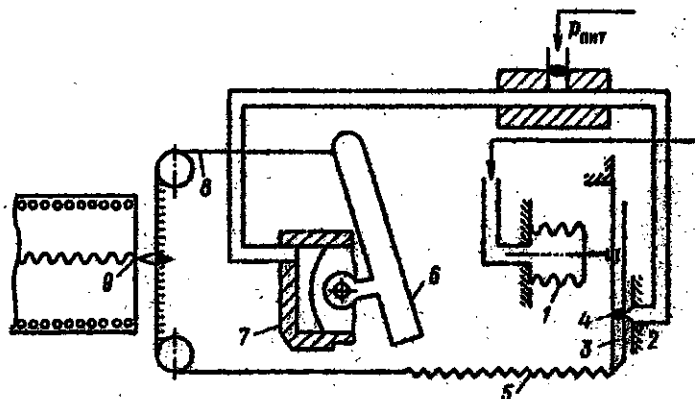


Рис.67. Схема пневматического прибора ПВ4.2З.

Принципиальная схема вторичного пневматического прибора типа ПВ 4.2З приведена на рис.67 [8].

При изменении входного давления происходит перемещение диафрагмы 1 и изменение зазора между соплом 2 и заборонкой 4, расположенной на конце рычага 3. Это приводит к изменению давления воздуха в линии сопла и силового элемента 7, чашечная мембрана которого перемещает рычаг 6. Последний с помощью лавсановой нити 8 и пружины 5 связан с рычагом 3, благодаря чему входное усилие на рычаге 3 уравновешивается усилием от давления в линии обратной связи. С нитью 8 связан указатель 9.

Самопишущие приборы имеют скорость движения диаграммы 20, 40 или 60 мм/ч, ширина диаграммы обычно равна 100 мм. Основная погрешность приборов составляет  $\pm 0,5 + 1,0\%$  от диапазона измерения.

#### Интегрирующие приборы

Для интегрирования пневматических сигналов, поступающих в датчиков расходомеров, применяются приборы типов ПИК-1 и ПБ 9.4П.

Электрические вторичные приборы. Из электрических вторичных приборов наибольшее распространение получили электронные автоматические мосты и потенциометры и миллиамперметры со стандартным входным сигналом (табл. 12, 13).

Таблица 12. Электрические вторичные приборы

Модификация	Название			
	Потенциометры	Миллиамперметры	Мосты	Приборы с дифференциальной схемой
Полногабаритные: с ленточной диаграммой с высокоомным входом	КСП-4	КСУ-4	КСМ-4	-
	КСПВ-4	-	-	-
Малогабаритные: с дисковой диаграммой	КСП-3	КСУ-3	КСМ-3	КСД-3

Продолжение табл. 12

Модификация	Название			
	Потенциометры	Миллиамперметры	Мосты	Приборы с дифференциальной схемой
с ленточной диаграммой	КСП-2	КСУ-2	КСМ-2	КСД-2
Миниатюрные:				
с вращающейся шкалой	КВП-1	КВУ-1	КВМ-1	КВД-1
с ленточной диаграммой	КСП-1	КСУ-1	КСМ-1	-
показывающие	КПП-1	КПУ-1	КПМ-1	-

Т а б л и ц а 13. Технические данные электронных автоматических потенциометров и мостов

Характеристика	Тип			
	КСП-1 КСМ-1	КСП-2 КСМ-2	КСП-3 КСМ-3	КСП-4 КСМ-4
Основная погрешность, %	1,0	0,5	0,5	0,25
Ширина (длина) диаграммы, мм	100	160	(600)	(250)
Скорость диаграммы, мм/ч	10-120	20-240 600-2400	1 об/сут	20-5400 200-54000
Количество точек измерения	1	1	1	1, 3, 6, 12, 24

Системой ГСП предусматривается выпуск электрических приборов нормального габарита (размеры по фасаду 400х400 мм), малогабаритных (240х320) и миниатюрных (160х200 мм). Длина шкалы у полногабаритных приборов составляет 250 мм, у малогабаритных 160 мм, у миниатюрных - 100 мм.

Приборы типа КС-3 и КС-4 могут иметь встроенные нормирующие преобразователи или пневматические пропорционально-ин-

тегральные регуляторы. Схема автоматического односточного потенциометра КСП-4 приведена на рис. 68. Измерительная схема потенциометра состоит из двух ветвей. В одну ветвь (измерительную) включены реохорд  $R_p$  и резисторы  $R_{ш}$ ,  $R_4$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Подстроечные резисторы  $R_H$  и  $R'_H$  служат для подгонки начала шкалы и пределов измерения. Резисторы второй ветви  $R_K$  и  $R'_K$  образуют вспомогательную цепь контроля рабочего тока измерительной схемы. Резистор  $R_K$  может использоваться для автоматической компенсации изменения температуры свободных концов термопар. Требуемое значение рабочего тока устанавливается, изменяя сопротивление  $R_H$  в цепи источника стабилизированного питания ИСП.

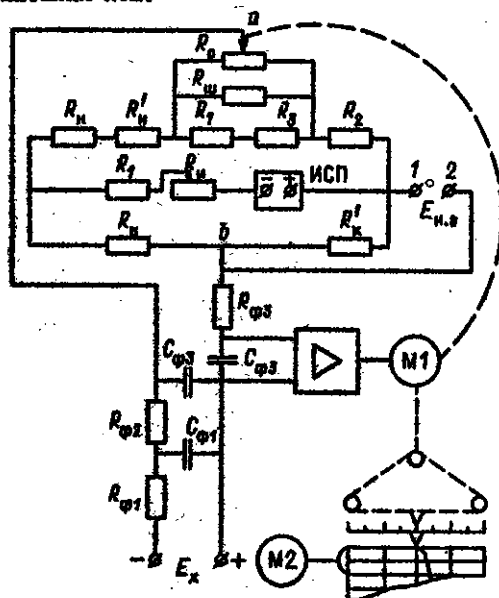


Рис. 68. Схема автоматического потенциометра.

Если измеряемая в.д.с.  $E_x$  не равна падению напряжения между точками  $a$  и  $b$ , то в усилитель будет поступать сигнал рассогласования. Для исключения дрейфа нуля усилителя работают на переменном токе. Во входном блоке усилителя сигнал рассогласования преобразуется в переменный и далее усиливается



по напряжению и мощности. Усиленный сигнал поступает в обмотку управления реверсивного двигателя М1. Направление вращения двигателя определяется знаком сигнала рассогласования. Вращение двигателя, кинематически связанного с движком реохорда, отстрелкой указателя и кареткой регистрирующего устройства, прекращается в момент равенства  $E_{\alpha} = U_{ab}$ .

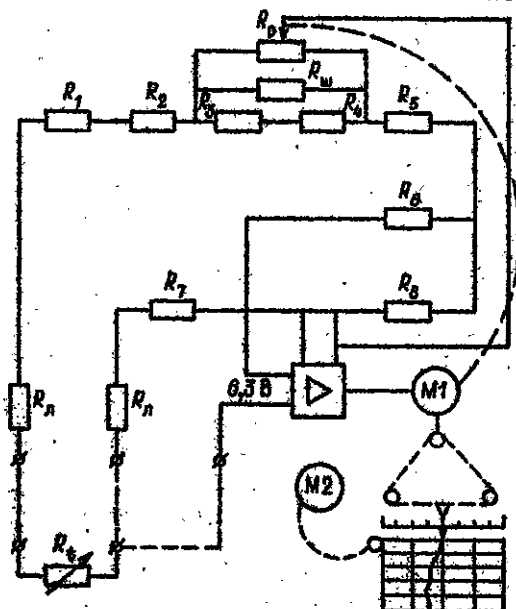


Рис. 69. Схема автоматического моста.

На рис. 69 приведена схема электронного автоматического моста КСМ-4. Термометр сопротивления  $R_2$  включен в качестве плеча в мостовую схему и соединен с мостом тремя проводами для компенсации их температурных изменений. При изменении сопротивления датчика усиленное возникающее напряжение разбалансировки заставлял вращаться двигатель М1, который перемещает движок реохорда до тех пор, пока не восстановится равновесие моста. В большинстве автоматических мостов используется напряжение питания переменного тока, которое без дополнительной стабилизации снимается с одной из обмоток силового трансфор-

матора усилителя. Колебания напряжения питания в пределах  $\pm 10\%$  от номинального значения 6,3В не вызывают дополнительной погрешности, так как автоматические мосты являются равновесными и, следовательно, в момент равновесия ток в измерительной диагонали равен нулю.

Подгоночные катушки  $R_d$  используются для приведения сопротивления соединительных линий к номиналу (2,5 Ом).

## 2.6. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

**2.6.1. Приборы системы "Старт".** Приборы системы "Старт" разработаны на основе элементов УСЭПА — унифицированной системы элементов промышленной пневмоавтоматики [8, 37, 41].

**Регуляторы.** Позиционный регулятор ПР1.5 предназначен для получения дискретных пневматических сигналов 0 и 1 при повышении или понижении значения регулируемого параметра от заданного значения. Диапазон входных сигналов 0,02–0,1 МПа. Погрешность срабатывания  $\pm 1,0\%$ .

Позиционный регулятор ПР1.6 с настраиваемой зоной нечувствительности служит для получения дискретных пневматических сигналов 0 и 1 при выходе параметров за пределы установленной зоны нечувствительности. Диапазон входных сигналов 0,02–0,1 МПа. Зона нечувствительности находится в пределах 0,01–0,08 МПа.

Пропорциональный регулятор ПР2.5 предназначен для получения непрерывного пропорционального регулирующего воздействия. Диапазон входных и выходных сигналов 0,02–0,1 МПа. Диапазоны дроселирования 5–100% и 5–300%.

Пропорционально-интегральный регулятор ПР3.31 применяется для автоматического поддержания заданной величины регулируемого параметра путем создания ПИ-зона регулирования. Диапазоны входных и выходных сигналов 0,02–0,1 МПа. Диапазоны дроселирования 2–100% и 2–300%, время интегрирования 3–6000с.

Принцип действия регулятора основан на компенсации сил, при этом механические перемещения чувствительных элементов близки к нулю, вследствие чего регулятор обладает высокой чувствительностью.

Сигналы, поступающие от задатчика и от измерителя, действуют на мембраны элементов выравнивания. Силы, развиваемые действием давления воздуха на мембраны блока выравнивания, уравновешиваются силами, действующими на мембраны отрицательной и положительной обратных связей. Пропорциональная составляющая регулятора вводится путем воздействия на отрицательную обратную связь, интегральная составляющая вводится посредством воздействия на положительную обратную связь. Степень воздействия этих составляющих настраивается регулирующими дросселями диапазона дроселирования и времени интегрирования.

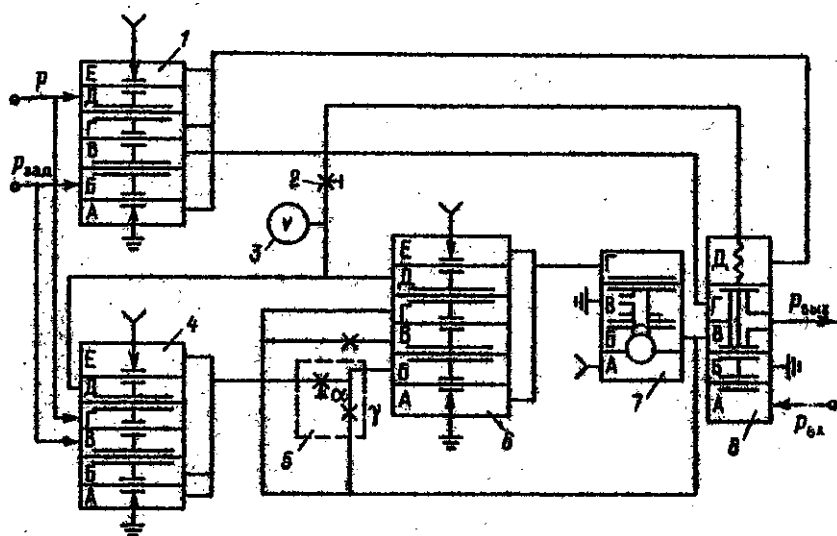


Рис. 70. Регулятор ПРЗ.31.

Принципиальная схема регулятора ПРЗ.31 приведена на рис. 70 [41]. Регулятор состоит в основном из элементов аналоговой техники: трех пятимембранных элементов выравнивания (1, 4, 6) и усилителя мощности 7. Кроме того, в прибор входит элемент релейной техники - трехклапанное реле 8, постоянные и регулируемые дроссели 2, 5, пневмочемкость 3.

Регулятор состоит из пропорционального и интегрального звеньев. Пропорциональное звено включает элементы 4, 5, а

интегральное - 1, 2, 3. Измеряемое давление  $p$  подводится к камерам  $D_1$  и  $\Gamma_4$ , а давление задания  $p_{зад}$  от задатчика к камерам  $B_4$  и  $B_4$ .

Зависимость выходного сигнала от сигнала рассогласования в ПИ-регуляторе обрабатывается по следующему уравнению:

$$p_{вых} = K(p - p_{зад}) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t (p - p_{зад}) dt, \quad (2.28)$$

где  $p_{вых}$  - выходное давление регулятора;  $K$  - коэффициент усиления, определяемый отношением проводимостей  $\alpha$  (регулируемого) и  $\gamma$  (постоянного) дросселей;  $T_{\text{и}}$  - время интегрирования.

Коэффициент усиления настраивается с помощью регулируемого дросселя  $\alpha$ , элемента 5. Время интегрирования настраивается дросселем 2. При закрытом дросселе 2 время интегрирования достигает максимального значения и регулятор превращается в пропорциональный. Выходное давление, обрабатываемое элементом 6, поступает на вход усилителя мощности 7 и усиленное по мощности на трехклапанное реле 8.

При автоматическом регулировании давление командного сигнала на трехклапанное реле  $p_{\text{вх}}=0$ , и выходной сигнал регулятора соединяется с линией исполнительного механизма. При подаче командного сигнала ( $p_{\text{вх}} \neq 0$ ) выходное давление регулятора отключается от линии исполнительного механизма.

Для гашения автоколебаний, возникающих в системе, вводятся две (положительная - в камеру  $B_6$  и отрицательная - в камеру  $\Gamma_6$ ) обратные связи, взаимно исключавшиеся в статике.

Пропорционально-интегральный регулятор ПРЗ.32 с местным задатчиком предназначен для регулирования параметров по ПИ-закону и комплектуется специальным гнездом, что позволяет регулятору работать без вторичного прибора. Задатчик установлен непосредственно в регуляторе. Диапазоны дросселирования 5-100% и 5-3000%, время интегрирования 3-6000с.

Пропорционально-интегральный регулятор соотношения ПРЗ.33 предназначен для поддержания постоянства соотношения двух параметров. Диапазоны дросселирования 5-100% и 5-3000%, время интегрирования 3-6000с, диапазон настройки соотношения от 1:1 до 1:10.

Пропорционально-интегральный регулятор соотношения ПРЗ.34 с коррекцией по третьему параметру служит для поддержания постоянства соотношения двух параметров и автоматической коррекции по третьему параметру. Диапазон настроек аналогичен регулятору ПРЗ.33.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор ПРЗ.35 реализует ПИД-закон регулирования. Диапазоны дросселирования 2-100% и 2-3000%, время интегрирования 3-6000 с, время предвращения 3-600 с.

**Функциональные приборы.** Прибор простейших алгебраических операций ПФ1.1 предназначен для алгебраического сложения трех пневматических сигналов, два из которых со знаком плюс и один со знаком минус. Прибор может быть использован для умножения или деления на два одного из сигналов. Основная допустимая погрешность прибора не превышает  $\pm 1,0\%$  от максимального выходного давления.

Прибор извлечения квадратного корня ПФ1.17 действует на основе реализации параболической зависимости вида

$$P_{\text{вых}} = \sqrt{0,8 (P_{\text{вых}} - 0,2 \cdot 10^5) + 0,2 \cdot 10^5} \text{ (Па)} \quad (2.29)$$

путем аппроксимации кривой тремя отрезками прямых линий. Основная погрешность прибора не превышает  $\pm 1,0\%$  от максимального выходного давления.

Множительно-делительное устройство ПФ1.18 предназначено для перемножения двух параметров и деления произведения на третий параметр в соответствии с уравнением

$$P_{\text{вых}} = (P_{\text{Зад}} - 0,2 \cdot 10^5) \frac{P_2 - 0,2 \cdot 10^5}{P_1 - 0,2 \cdot 10^5} + 0,2 \cdot 10^5 \text{ (Па)} \quad (2.30)$$

В частном случае устройство может решать следующие задачи: перемножение двух параметров, деление меньшего параметра на больший, возведение параметра в квадрат. Основная погрешность прибора  $\pm 1,0 - 1,5\%$ .

Множитель на постоянный коэффициент ПФ1.9 предназначен для умножения параметра на постоянный коэффициент  $K$  по формуле

$$P_{\text{вых}} = K (P_{\text{вых}} - 0,2 \cdot 10^5) + 0,2 \cdot 10^5 \text{ (Па)}. \quad (2.31)$$

Пределы настройки коэффициента  $0,2 + 0,9$  и  $1,1 + 5,0$ ; допустимая погрешность прибора  $\pm 1,0\%$ .

Пневматический программный задатчик по параметру П66.2 предназначен для реализации по заданной программе функциональной зависимости между входными и выходными сигналами, изменяющимися в диапазоне  $0,02-0,1$  МПа. Принцип действия прибора основан на преобразовании линейных перемещений ролика по ребру вращающегося от пневматического сервопривода программного диска в пропорциональный пневматический сигнал.

**2.6.2. Приборы системы "Каскад".** Система "Каскад" является транзисторной электрической унифицированной системой приборов, использующей сигнал постоянного тока  $0-5$  мА. В состав системы "Каскад" входят следующие основные группы приборов: регулирующие блоки, алгебраические блоки, динамические преобразователи, задающие устройства, блоки управления и усилители мощности [6,8,41].

**Регулирующие блоки.** Регулирующие блоки системы "Каскад" служат для формирования закона регулирования. В состав системы "Каскад" входит аналоговые и релейные регулирующие блоки.

Блок регулирующий аналоговый Р12 предназначен для применения в АСУ в качестве регулирующего устройства, работающего в комплекте с исполнительными механизмами, оснащенными электропневмопреобразователями или аналоговыми усилителями мощности. Блок Р12 формирует ПИД-закон регулирования в соответствии с алгоритмом

$$x_{\text{вых}}(p) = \frac{K}{1 + T_d p} \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_{\text{диф}} p \right) x_{\text{вх}}(p), \quad (2.32)$$

где  $T_{\text{диф}}$  — постоянная времени дифференцирования;  $T_d$  — постоянная времени демпфирования.

Выходной сигнал изменяется в диапазоне  $0-5$  мА. На рис. 71 приведена функциональная схема блока Р12.

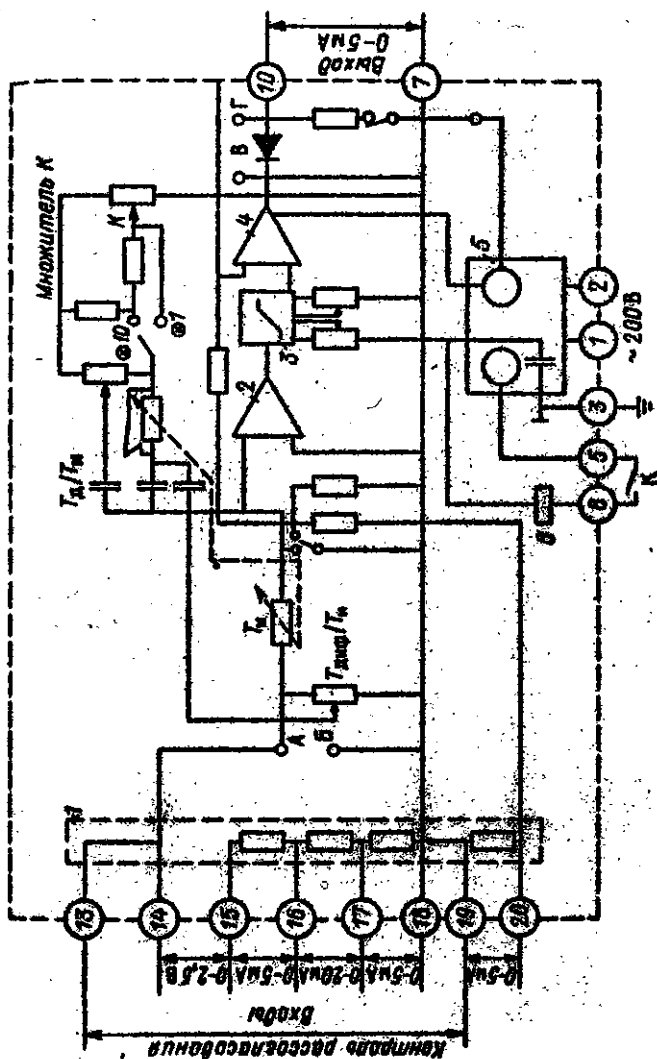


Рис. 72. Регулирующий блок РГ2.

Регулирующий блок Р12 состоит из измерительной цепи 1, операционного усилителя 2, узла ограничения 3, нормирующего усилителя 4, реле 6 и источника питания 5. В измерительной цепи происходит преобразование токовых сигналов в сигналы напряжения и последовательное их суммирование с целью выделения сигнала рассогласования. На входе усилителя суммируются входной сигнал и сигнал обратной связи, формирующий ПИД-закон регулирования. Усилитель 4 преобразует выходное напряжение в токовый сигнал 0 – 5 мА. Реле 6 и ключ К служит для переключения с ручного управления на автоматическое и обратно.

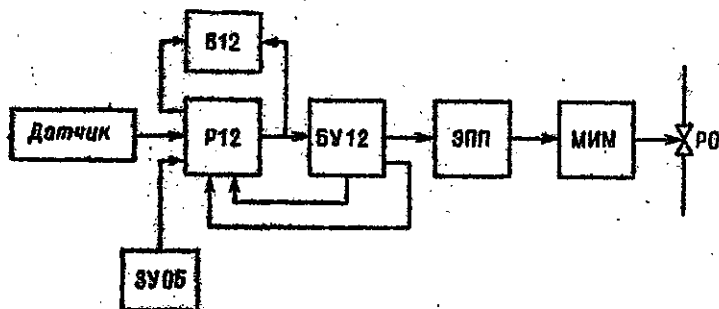


Рис. 72. Применение блока Р12.

На рис. 72 показано применение блока Р12 с использованием электропневмопреобразователя.

С помощью блока ВУ12 осуществляется ручное управление объектом и безударное переключение с ручного управления на автоматическое и обратно. Блок В12 служит для индикации сигнала рассогласования на входе регулирующего блока и для контроля его выходного тока. Задание регулятору устанавливается задатчиком ЗУ05.

Блок Р12 имеет следующие диапазоны параметров настройки:  
 $K = 0,5 + 100$ ;  $T_n = 0,5 + 2000$  с;  $T_{\text{диф}} / T_n = 0 + 0,5$ ;  
 $T_d / T_n = 0 + 0,12$ .

Блок регулирующий релейный Р21 предназначен для применения в АСР в качестве регулирующего устройства, работающего в комплекте с электрическим исполнительным механизмом постоянной скорости либо в качестве позиционного регулятора. На выходе блока образуется последовательность импульсов напряже-



ния. В комплекте с исполнительным механизмом постоянной скорости блок Р2И формирует ПИ-закон регулирования в соответствии с алгоритмом

$$I_{\text{вых}}(p) = \frac{K}{1 + T_{\text{св}} p} \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{д}} p} \right) I_{\text{вх}}(p). \quad (2.33)$$

Коэффициент пропорциональности регулятора находится из выражения

$$K = \frac{1}{v_{\text{св}} T_{\text{св}}}, \quad (2.34)$$

где  $v_{\text{св}}$  - скорость связи;  $T_{\text{св}}$  - время полного перемещения выходного вала исполнительного механизма.

Диапазон параметров настройки следующий:  $v_{\text{св}} = 0,1 + 2,5\%/с$ ;  $T_{\text{д}} = 5 + 12000 с$ ;  $T_{\text{д}} = 0 + 9$ .

Алгебраические блоки. Блок суммирования А04 предназначен для суммирования с независимым масштабированием четырех токовых сигналов в соответствии с алгоритмом

$$I_{\text{вых}} = K_1 I_{\text{вх}_1} + K_2 I_{\text{вх}_2} + K_3 I_{\text{вх}_3} + K_4 I_{\text{вх}_4} + I_{\text{см}}, \quad (2.35)$$

где  $I_{\text{вх}}$ ,  $I_{\text{вых}}$ ,  $I_{\text{см}}$  - входной, выходной сигналы и сигнал смещения, мА.

Блок умножения А31 выполняет операцию умножения двух токовых сигналов в соответствии с алгоритмом

$$I_{\text{вых}} = 0,2 I_{\text{вх}_1} I_{\text{вх}_2}. \quad (2.36)$$

При объединении входов блок выполняет операцию возведения в квадрат.

Блок деления А32 выполняет операцию деления двух токовых сигналов в соответствии с алгоритмом

$$I_{\text{вых}} = \frac{I_{\text{вх}_1}}{I_{\text{вх}_2}}. \quad (2.37)$$

Блок извлечения корня А33 выполняет операцию извлечения квадратного корня в соответствии с алгоритмом

$$I_{\text{вых}} = \sqrt{5 I_{\text{вх}}}. \quad (2.38)$$

Динамические преобразователи. Блок дифференцирования ДД выполняет операцию реального дифференцирования в соответствии с алгоритмом

$$x_{\text{вых}}(p) = \frac{\lambda_{\text{диф}}}{T_{\text{д}} p + 1} \frac{T_{\text{диф}} p}{T_{\text{диф}} p + 1} x_{\text{вх}}(p). \quad (2.39)$$

В блоке имеется возможность установки П-режима (режима усиления) с алгоритмом

$$x_{\text{вых}}(p) = \frac{\lambda_{\text{диф}}}{T_{\text{д}} p + 1} x_{\text{вх}}(p). \quad (2.40)$$

Коэффициент усиления изменяется в пределах 0,05 - 40.

Задающие устройства. Устройство задающее токовое ЗУОБ применяется в качестве ручного токового задатчика, осуществляющего линейное преобразование угла поворота потенциометра в выходной токовый сигнал. Шкала блока 0 - 100%.

Блоки управления. Блок управления аналогового регулятора БУ12 обеспечивает ручное управление нагрузкой регулирующего блока, безударное переключение с ручного управления на автоматическое и обратное переключение. Блок БУ12 применяется в комплекте с аналоговыми регулирующими блоками.

Блок управления релейного регулятора БУ21 обеспечивает ручное управление нагрузкой регулирующего блока, безударное переключение с автоматического управления на ручное и обратно.

Блок БУ21 применяется в комплекте с релейными регуляторами, работающими с магнитными пускателями ПМРТ-69 или тиристорными пускателями У21 и У22.

Приборы системы АКЭСР и СУПС описаны в Приложениях.

## 2.7. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИГНАЛОВ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Преобразователи служат для преобразования рода энергии измерительных сигналов и применяются для согласования параметров взаимосвязанных приборов с различными принципами действия.

Электронепневматический преобразователь ЭНП-63 служит для преобразования непрерывного сигнала постоянного тока 0-5 мА в пневматический сигнал 0,02 - 0,1 МПа (рис. 73) [37].

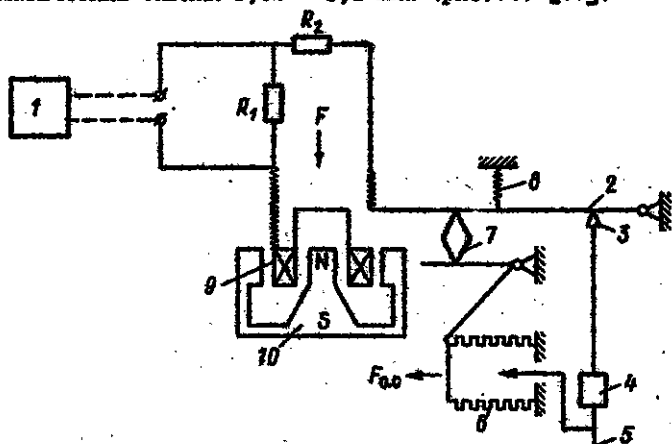


Рис. 73. Электронепневматический преобразователь.

Выходной сигнал с датчика 1 подается в катушку 9 магнитоэлектрического силового преобразователя. При изменении тока в катушке за счет его взаимодействия с магнитным полем постоянного магнита 10 рычаг с заслонкой 2 будет перемещаться относительно сопла 3. Усилие на рычаге с пружиной 6 уравновешивается реакцией шильфона обратной связи 8 через опору 7. Выходное давление через усилитель 4 поступает в линию передачи 5.

Основная погрешность выходного сигнала не превышает  $\pm 1\%$  от диапазона выходного сигнала.

Пневмоэлектрический преобразователь ПЭ-53М служит для преобразования пневматического сигнала 0,02-0,1 МПа в унифицированный токовый 0-5 мА. Основная погрешность преобразователя не превышает  $\pm 1,0\%$  от верхнего предела изменения выходного сигнала [37].

Каждая автоматическая система управления имеет исполнительное устройство (ИУ), состоящее из регулирующего органа (РО), непосредственно воздействующего на процесс, и исполнительного

механизма (ИМ), т.е. привода, который управляет регулирующим органом.

На рис. 74 приведены конструкторские схемы регулирующих органов. Выбор того или иного РО определяется в основном свойствами среды, которая проходит через него, а также требуемой пропускной способностью (табл. 14) [6, 37, 41].

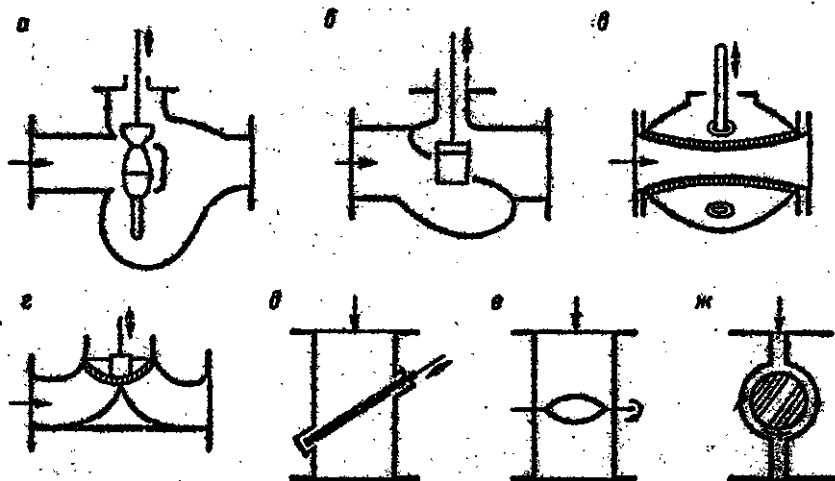


Рис. 74. Регулирующие органы.

а - двухседельный клапан; б - односедельный клапан; в - шланговый клапан; г - диафрагмовый клапан; д - клиновидная задвижка; е - дисковая заслонка; ж - шаровый клапан.

Таблица 14. Технические характеристики исполнительных устройств

Т и п	Условное давление, МПа	Условный проход, мм	Температура не более, °С	Материал	
				корпуса (футеровки)	затвора
1	2	3	4	5	6
Клапаны регулирующие двухседельные					
25ч30нж(НО) 25ч32нж(НЗ)	1,6	15-300	300	Чугун	Х16Н9Т

Продолжение табл. 14

1	2	3	4	5	6
25с30нж(НО) 25с32нж(НЗ) 25нж30нж(НО)	1,6	15-300	300	Сталь	X18H9T
25нж32нж(НЗ)	1,6	15-300	300	X18H12M2T	X18H12M2T
K-40 KЯ-40	4,0 4,0	15-70 15-150	300	Ст.20 X18H9T	Ст.20 X18H9T
Клапаны регулирующие односедельные					
УКС-64(угловой) ПКС-64(проходной)	6,4	6-25	200	Ст.20	Ст.20
УКН-64(угловой) ПКН-64(проходной)	6,4	6-25	200	X18H9T	X18H9T
СИУ, ряд 363	1,6	25-80	150	Чугун	Ст.20
Клапаны регулирующие диафрагмовые					
25ч5п1(НО) 25ч5п2(НО) 25ч7п1(НЗ) 25ч7п2(НЗ)	0,3-1,0	10-100	60-100	Полиэтилен Фторопласт Полиэтилен Фторопласт	- 42П - 42П
25ч5а1, 25ч5а2, 25ч7а1(НЗ), 25ч7а2	0,3-1,0	15-100	130	Эмаль	Полиэтилен
Клапаны регулирующие шланговые					
КРП	0,4-0,6	25-80	80	Чугун	Резина
Заслонки регулирующие дисковые					
ТА СИУ, ряд 101	1,0-2,5 0,6	100-200 80-600	200 200		Чугун
Задвижки шиберные с пневмоприводом					
ТУ от 26.08.65					
-	0,4	80-500	50	Чугун	X17

Клапаны регулирующие двухседельные имеют два седла, что обеспечивает почти полную разгрузку затвора. Диаметр этих клапанов 15-300 мм. Двухседельные клапаны применяются для чистых жидкостей, паров и газов.

Клапаны регулирующие односедельные имеют одно седло, что упрощает их конструкцию, повышает герметичность, но создает нагрузку на затвор. Эти клапаны можно использовать не только для чистых, но также для слабозагрязненных и вязких сред.

Шланговые регулирующие клапаны в качестве рабочего элемента имеют пережимаемый шланг из резины или пластмассы. Эти клапаны используются для регулирования расходов сильнозагрязненных, агрессивных и волокносодержащих сред, различных суспензий, шлама и т.п. Однако применение их ограничено: по давлению не более 0,6-1,0 МПа, по температуре среды не более 80-90°C и по условному проходу не более 150-200 мм.

Диафрагмовые регулирующие клапаны имеют обычно корпус, футерованный резиной, пластмассой (в том числе фторопластом) или эмалью, и диафрагму, изготовленную из резины, фторопласта или другой пластмассы. Диафрагмовые клапаны используются на загрязненных, агрессивных и волокносодержащих растворах, суспензиях и шламах. Применение их ограничено: по давлению не более 0,3-1,0 МПа, по температуре 60-130°C, по условному проходу 15-150 мм.

Заслоночные регулирующие органы могут применяться для самых различных сред, в том числе для суспензии концентрации до 4%. Все заслоночные РО неуравновешены и требуют установки ИМ большой мощности.

Шиберные (ножевые) задвижки являются основной запорной арматурой для суспензий. Изготавливаются из обычной и кислотостойкой стали диаметром до 500 мм на давление до 0,4 МПа.

Шаровые регулирующие органы, у которых затвор представляет собой шар с прорезанным цилиндрическим отверстием, являются наиболее надежными регулируемыми органами для суспензий, особенно при концентрации выше 4% (в СССР не изготавлиются).

В качестве исполнительных механизмов применяют пневматические, электрические и гидравлические приводы. При этом возможно НО- (нормально открытое, воздух закрывает) и НЗ-

(нормально закрытое, воздух открывает) исполнение ИУ. Выбор той или иной модификации производится исходя из необходимости обеспечения минимального нарушения технологического режима при отказе ИУ (отсутствии воздуха питания). Клапаны типа ИЗ нужно обязательно применять при регулировании подачи высокоагрессивных или ядовитых веществ (хлор, диоксид хлора, цианолоты, щелочи и т.д.), а также в случаях, когда допустимое давление в резервуаре ниже давления в питающей линии.

Электрические исполнительные механизмы представляют собой электроприводы, предназначенные для перемещения регулируемых органов в системах автоматического управления. Электрические исполнительные механизмы состоят из следующих основных элементов: электродвигателя; редуктора, понижающего число оборотов; выходного устройства для механического сочленения с регулируемым органом; дополнительных устройств, обеспечивающих останова механизма в крайних положениях, самоторможение при отключении электродвигателя, возможность ручного привода на случай выхода из строя системы автоматизации или для наладки, обратную связь в автоматической системе управления, дистанционное указание и сигнализацию положения механизма.

Выходные устройства электрических исполнительных механизмов выполняются так, чтобы осуществить вращательное или прямолинейное движение. Механизмы с вращающимися выходными устройствами подразделяются на однооборотные (МЭО), у которых угол поворота выходного вала менее или равен  $360^\circ$ , и многооборотные (МЭМ), у которых выходной вал совершает более одного оборота. Прямоходные электрические исполнительные механизмы (МЭП) предназначены для управления регулирующими органами с прямолинейным перемещением рабочего органа.

Электрические исполнительные механизмы подключаются к электронным регуляторам через магнитные и тиристорные усилители типов УМД и У-21 (бесконтактное управление) или пускатели магнитные реверсивные типов МР-0-56 и ПМР-69 (контактное управление).

## Глава 3

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

#### 3.1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Функциональная схема автоматизации является основным техническим документом, определяющим функциональную структуру и объем автоматизации технологических установок и отдельных агрегатов технологического процесса.

Прочитать функциональную схему автоматизации — это значит определить из нее: параметры технологического процесса, подлежащие автоматическому контролю и регулированию; наличие автоматических систем защиты, блокировки и аварийной сигнализации; организацию пунктов контроля и управления; технические средства, с помощью которых решается та или иная задача автоматического контроля, регулирования, управления.

Чтобы прочитать функциональную схему автоматизации, необходимо знать принципы построения систем автоматизации и условные изображения технологического оборудования, приборов и средств автоматизации.

До июля 1979 г. условные обозначения в схемах автоматизации выполнялись только по ГОСТ 3925-59. Параллельно с ГОСТ 3925-59 с января 1978 г. был введен в действие ОСТ 36.27-77 на условные обозначения в схемах автоматизации технологических процессов. Этот стандарт составлен с учетом рекомендаций по стандартизации СЭВ РС4388-74 "Приборы и средства автоматизации. Схемы автоматизации технологических процессов. Условные обозначения" и проекта международного стандарта. С 1986 г. ОСТ 36.27-77 заменен на ГОСТ 21.404-85.

Вместо принципа обозначения приборов и средств автоматизации по конструктивным признакам, используемого в ГОСТ 3925-59, в ГОСТ 21.404-85 система обозначений основывается на функциональных признаках.



Настоящий стандарт устанавливает два способа построения условных графических изображений — упрощенный и развернутый.

Упрощенный способ применяется в основном для изображения приборов на технологических схемах. При упрощенном способе на схемах не показываются первичные измерительные преобразователи и вспомогательная аппаратура. Приборы и средства автоматизации, осуществляющие сложные функции (контроль, регулирование, сигнализацию и т.п.) и выполненные в виде отдельных блоков, представляются одним условным графическим обозначением. Развернутый способ применяется для изображения функциональных схем автоматизации, принципиальных пневматических схем, а также для схем внешних электрических и трубных проводов.

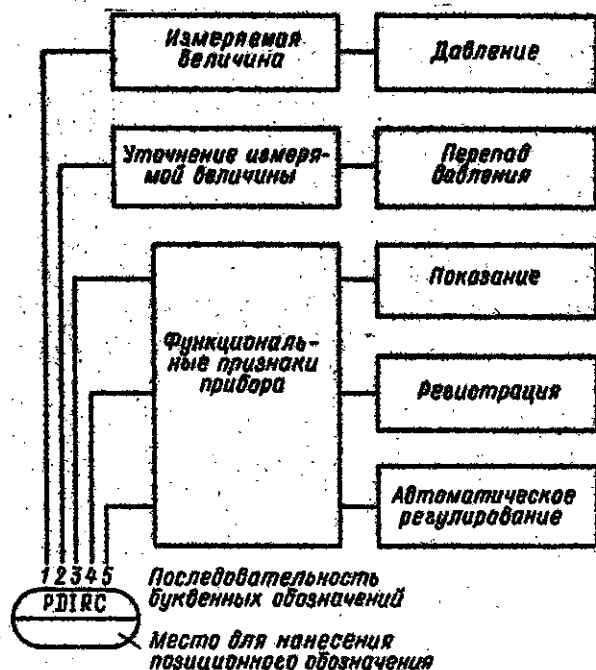


Рис. 75. Пример построения условного обозначения прибора для измерения, регистрации и автоматического регулирования перепада давления.

При развернутом способе каждый прибор или блок, входящий в комплект (измерительный, регулирующий или управляющий), изображается отдельным графическим элементом. Сложные приборы, выполняющие несколько функций, допускается изображать несколькими окружностями, расположенными один относительно другого.

Методика построения графических элементов является общей для обоих способов. В верхней части окружности записываются (слева направо): обозначение основной измеряемой величины; обозначение, уточняющее (если это необходимо) основную измеряемую величину; обозначение (обозначения) функционального признака прибора.

Пример построения условного обозначения прибора для измерения, регистрации и автоматического регулирования перепада давления приведен на рис. 76.

Порядок расположения буквенных обозначений функциональных признаков (если их несколько в одном приборе) должен быть следующим: в нижней части окружности наносятся позиционные обозначения (цифровое или буквенно-цифровое), служащее для нумерации комплекта измерения или регулирования (при упрощен-

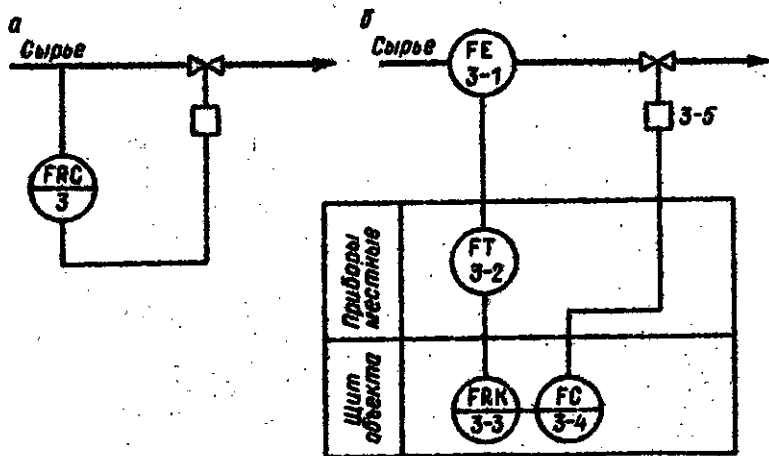


Рис. 76. Пример изображения АСР расхода технологического сырья.

*а* – упрощенный способ изображения, *б* – развернутый способ изображения.

ном способе построения условных обозначений) или отдельных элементов комплекта (при развернутом способе) по заказной спецификации проекта. В отдельных случаях, когда позиционное обозначение прибора не помещается в окружности, допускается нанесение его вне пределов окружности.

Щиты и пульты управления изображаются в виде прямоугольников произвольных размеров, достаточных для нанесения графических обозначений устанавливаемых на них приборов, средств автоматизации, аппаратуры управления и сигнализации.

На рис. 76 дан пример изображения АСР (автоматической системы регулирования) расхода.

Ниже для изображения функциональных схем автоматизации мы будем использовать упрощенный способ изображения.

Следует указать некоторые особенности изображения по ГОСТ 21.404-85. Отборное устройство для всех постоянно подключенных приборов не имеет специального обозначения, а представляет собой тонкую сплошную линию, соединяющую технологический трубопровод или аппарат с первичным измерительным преобразователем или прибором. При необходимости указания точного места расположения отборного устройства или точки измерения (внутри контура технологического аппарата) в конце тонкой линии изображается окружность диаметром 2 мм. Допускается изображать запорную и регулируемую арматуру, применяемую в системах автоматизации (например, задвижки, заслонки, шиберы, направляющие аппараты и прочее), в соответствии с действующими стандартами. Подвод линий связи к символу прибора можно показывать в любой точке окружности (сверху, снизу, сбоку). При необходимости указания направления передачи сигнала на линиях связи допускается наносить стрелки.

### 3.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЦЕЛЛЮЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

3.2.1. Автоматизация производства полуфабрикатов. Пр  
изводство древесной массы на  
дефибрерах. На процесс отлива и формирования бумажного полотна большое влияние оказывает качество древесной

массы: степень помола, фракционный состав, механические свойства и др.

Основным агрегатом, вырабатывающим древесную массу, является дефибрер. Схема автоматизации дефибрера непрерывного действия приведена на рис. 77.

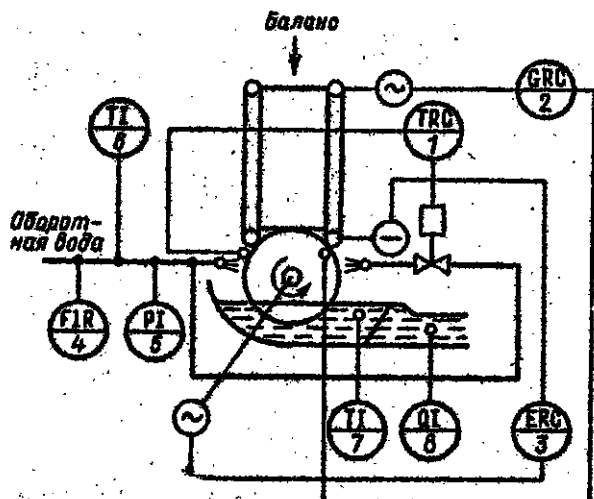


Рис. 77. Схема автоматизации дефибрера непрерывного действия.

АСР температуры массы (1) на выходе из зоны дефибрирования состоит из специального датчика, установленного в паровом пространстве над камнем, регулятора и регулирующего органа на трубопроводе сырьевой воды. Зазор между камнем и шахтой дефибрера регулируется путем воздействия на электродвигатель привода шахты дефибрера (2). Регулирующим воздействием в АСР мощности (3) является скорость подачи древесины к камню дефибрера. Схема автоматизации включает также следующие АСК (автоматические системы контроля): расхода (4), давления (5), температуры (6), обратной (сырьевой) воды, температуры древесной массы в ванне (7), концентрации древесной массы на выходе (8).

Производство целлюлозы в котлах периодического действия. При периодической варке целлюлозы используются варочные котлы с

косвенным нагревом варочного раствора в теплообменниках. Схема автоматизации производства целлюлозы в котле периодического действия приведена на рис.78.

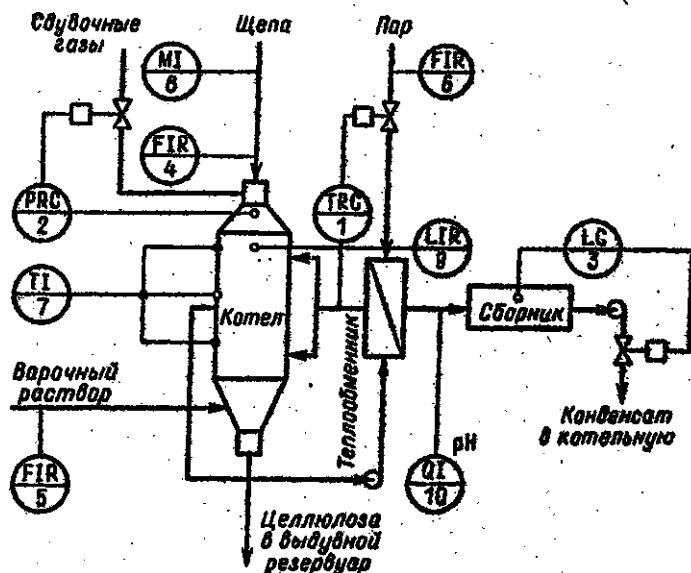


Рис.78. Схема автоматизации производства целлюлозы в котле периодического действия с косвенным нагревом.

Автоматизация периодической варки целлюлозы позволяет обеспечить заданные величины выхода целлюлозы из древесины, процента непровара, механической прочности целлюлозы. Варочный процесс ведется по заданному температурному графику при помощи программной АСР (1), датчик которой устанавливается на трубопроводе раствора после подогревателя (теплообменника), а регулирующий орган - на трубопроводе пара к подогревателю. В процессе нагревания из котла необходимо удалить воздух и несконденсировавшиеся газы. Для этой цели на сдувной линии устанавливают регулирующий орган, с помощью которого регулируют давление в котле (2). В сборнике конденсата уровень регулируется путем воздействия на расход конденсата в котельную (3).

Для контроля варочного процесса используются следующие АСК:

- расходов щепы (4), варочного раствора (5) и пара (8);
- температуры по зонам котла (7);
- влажности щепы (8);
- уровни в котле (9);
- величины pH конденсата (10), служащей для контроля работы подогревателя.

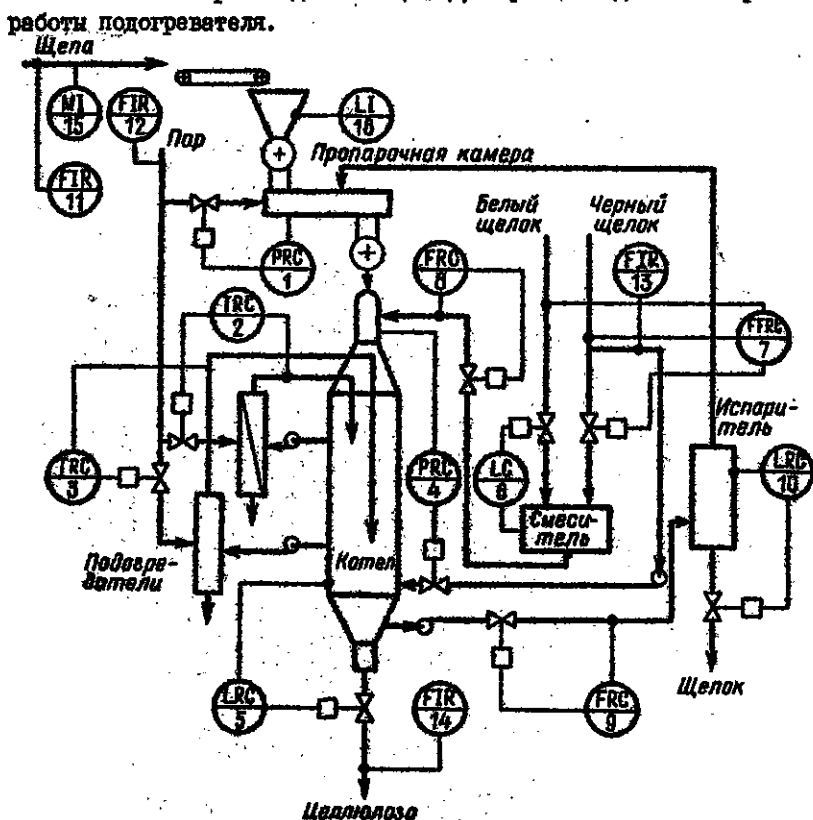


Рис.79. Схема автоматизации производства целлюлозы в аппарате типа "Камюр".

Производство целлюлозы в аппаратах непрерывного действия типа "Камюр". Схема автоматизации производства

целлюлозы в аппарате непрерывного действия "Камер" представлена на рис. 79.

Процесс варки целлюлозы в аппарате "Камер" состоит из нескольких стадий обработки щепы паром и химикатами с использованием косвенного подогрева реакционной смеси. Пропарка щепы предназначена для удаления воздуха из нее, а также для ее подогрева и увлажнения. Пропарка осуществляется в специальной камере, затем щепа подается питателем высокого давления в варочный котел. Варочная зона котла разделяется на верхнюю и нижнюю ступени. В верхней ступени идет пропитка щепы варочным щелоком и варка, а в нижней – полученная целлюлозная масса разбавляется черным щелоком и охлаждается, после чего она подается через концентратор к выдувному резервуару, где частично промывается.

Давление в пропарочной камере регулируется путем изменения расхода свежего пара (1). Температура по зонам варочного котла регулируется с помощью АСР, датчики которых расположены на трубопроводах щелока после подогревателей, а регулирующие органы – на паропроводах к подогревателям (2, 3). Давление в котле регулируют изменением расхода черного щелока в нижнюю зону котла (4), а уровень – по выходу целлюлозы из котла (5). Дозировку белого щелока регулируют по уровню в смешительном баке (6), а черного – с помощью регулятора соотношения белого и черного щелоков (7). Необходимый гидромодуль варки устанавливают по расходу варочного щелока (8). Количество щелока, отбираемого в испаритель, регулируют с помощью АСР расхода (9), а уровень в испарителе – по расходу щелока (10).

Для контроля процесса варки используются следующие АСК:

- расходов щепы (11), пара (12), черного щелока в нижнюю зону котла (13) и целлюлозы на выходе (14);
- влажности щепы (15);
- уровня щепы в загрузочном бункере питателя низкого давления (16).

**Промывка целлюлозы.** Промывка целлюлозы производится обычно на вакуум-фильтрах. Схема автоматизации приведена на рис. 80.

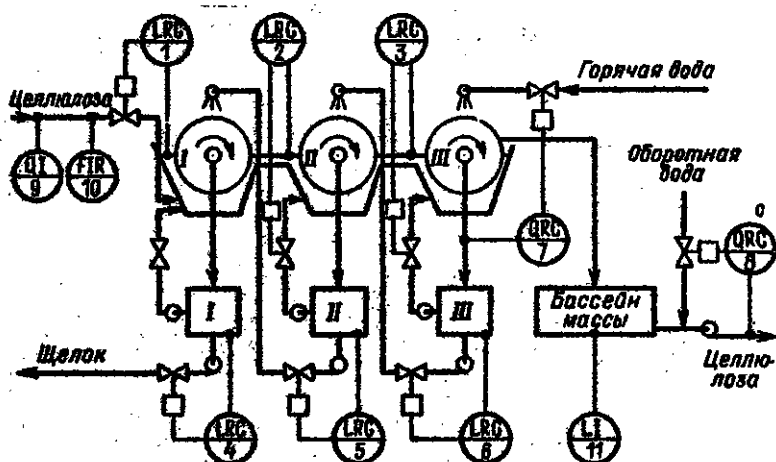


Рис. 60. Схема автоматизации промывки целлюлозы на вакуум-фильтрах.

Промывка целлюлозы после варки предназначена для разделения целлюлозы и черного щелока. Целлюлоза поступает на I вакуум-фильтр, а горячая опрыскиваемая вода - на последнюю ступень промывки. Промывка производится по принципу противотона. Фильтрат собирается в сборники и используется для промывки и разбавления целлюлозы. Крепкий щелок с I вакуум-фильтра идет на выпарку, а целлюлоза с III вакуум-фильтра - в бассейн целлюлозы и далее на отбелку.

Расход целлюлозы на промывку регулируется в зависимости от уровня в ванне I вакуум-фильтра (1). Уровни в ваннах последующих вакуум-фильтров регулируются путем изменения расхода разбавляющей воды (2, 3). В сборниках фильтрата уровни регулируются с помощью АСР (4-6), управляющих расходом фильтрата из сборников на sprays. На последней ступени промывки степень промывки целлюлозы регулируется с помощью АСР, датчик которой (измеритель электропроводности) устанавливается на входе фильтрата с III вакуум-фильтра, а регулирующий клапан - на линии горячей воды (7). Концентрация целлюлозы на выходе регулируется изменением расхода оборотной воды (8).



Контроль процесса промывки осуществляется с помощью следующих АСК:

- концентрации целлюлозы на выходе (9);
- расхода целлюлозы на входе (10);
- уровня целлюлозы в сборнике (11).

**Отбелка целлюлозы.** Отбелку целлюлозы проводят на многоступенчатых установках, в состав которых входят ступени хлорирования, гипохлоритной отбелки, отбелики двуокисью хлора, щелочения, клясовки и промежуточной промывки на вакуум-фильтрах.

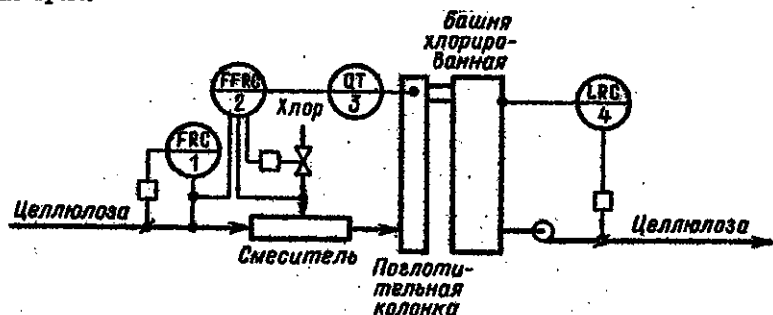


Рис.81. Схема автоматизации хлорирования целлюлозы.

Схема автоматизации хлорирования целлюлозы приведена на рис.81. Производительность отбельной установки задается с помощью АСК расхода целлюлозы (1). Одним из основных параметров ступени хлорирования является степень делигнификации (жесткость) целлюлозы на выходе. Эта величина регулируется косвенно. Способ регулирования заключается в изменении соотношения расходов целлюлозы и хлора (2) с коррекцией по окислительно-восстановительному потенциалу (ОВП) (3), измеряемому в верхней части поглотительной колонки. Для обеспечения постоянной продолжительности отбели в башне хлорирования регулируется уровень (4) путем изменения расхода целлюлозы на выходе.

Схема автоматизации щелочения целлюлозы представлена на рис.82. При отбелке целлюлозы используют три вида обработки ее щелочью: щелочение, горячее облагораживание, холодное облагораживание. Щелочение – основная часть многоступенчатого

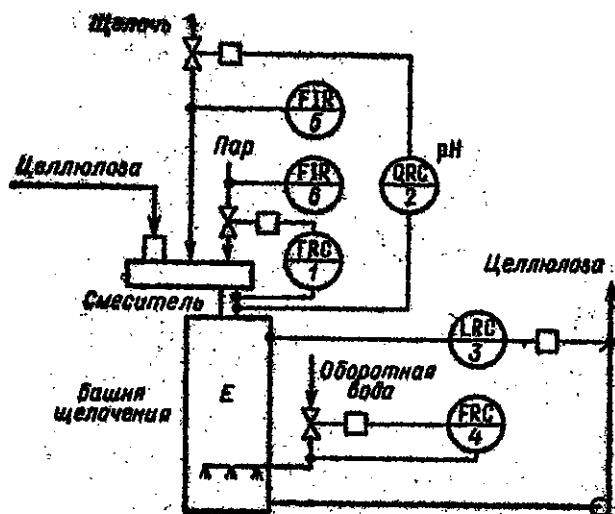


Рис. 82. Схема автоматизации щелочения целлюлозы.

процесса отбелки. После удаления щелочью хлорированного, окислившегося лигнина и других нецеллюлозных примесей белизна целлюлозы повышается. Процесс щелочения — это стадия отбелки без сильного окисления и ослабления волокон. Основными регулируемыми параметрами процесса щелочения являются температура, расход щелочи и продолжительность щелочения. Температура регулируется изменением расхода пара в смеситель-подогреватель (1). Расход щелочи регулируется косвенно по величине pH щелока, отбираемого с помощью специального пробоотборника после смесителя (2). Стабилизация продолжительности щелочения обеспечивается АСУ уровня (3), регулятор которой управляет регулирующей заслонкой на выходе. С целью стабилизации концентрации целлюлозы регулируется расход обратной воды в зону разбавления (4).

Для контроля процесса щелочения используются АСУ расходов щелочи (5) и пара (6).

Схема автоматизации отбелки целлюлозы гипохлоритом приведена на рис. 83. Качество целлюлозы после гипохлоритной отбелки зависит от температуры, расхода химикатов, продолжительности отбелки и концентрации целлюлозы.

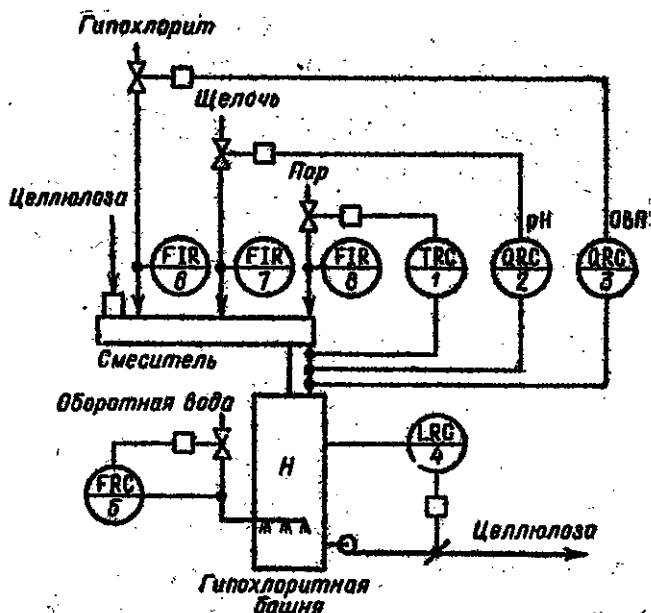


Рис. 83. Схема автоматизации отбелки целлюлозы гипохлоритом.

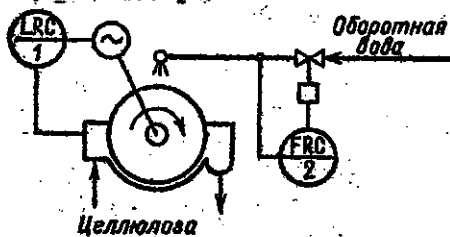
Регулирование температуры производится путем изменения расхода пара в смеситель-подогреватель (1). Дозировка химикатов производится с помощью АСР координных параметров - величины pH (2) и ОВП (окислительно-восстановительного потенциала) (3) щелока, отбираемого после смесителя с помощью специального пробоотборника. Продолжительность отбелки регулируется координно с помощью АСР уровня (4).

Для стабилизации концентрации целлюлозы стабилизируют расход обратной воды в зону разбавления башни (5).

Такая схема регулирования обеспечивает постоянное качество целлюлозы, в первую очередь ее белизну, при постоянной производительности отбелочной установки. При наличии возмущений по производительности схема усложняется: вместо АСР координных параметров (pH, ОВП) необходимо применять АСР соотношения целлюлозы и химикатов с коррекцией по координным параметрам.

Для контроля процесса отбели целлюлозы гипохлоритом используются АСК расходов гипохлорита (6), щелочи (7) и пара (8).

По аналогичной схеме автоматизируется отбели целлюлозы двуокисью хлора.



После каждой ступени отбели целлюлозы промывается на вакуум-фильтрах. Схема автоматизации промывки целлюлозы при ее отбелке представлена на рис. 84.

Рис. 84. Схема автоматизации промывки целлюлозы при отбелке. При промывке уровень целлюлозной массы в ванне вакуум-фильтров регулируют изменением скорости вращения сарбана (1), регулируют также расход обратной воды (2).

3.2.2. Автоматизация производства бумаги. Производство бумаги заключается в подготовке бумажной массы к отливу и изготовлении бумаги на бумагоделательной машине. Подготовка бумажной массы в общем случае включает роспуск, размол и составление композиции.

Роспуск может быть как периодическим, так и непрерывно-дискретным технологическим процессом. Роспуск в гидроразбивателе периодического действия характеризуют следующие параметры: масса сырья, сухость сырья, масса обратной воды, концентрация обратной воды, время роспуска сырья, скорость вращения ротора, мощность, потребляемая электроприводом ротора в процессе роспуска, концентрация в ванне гидроразбивателя, средний уровень в ванне, количество пучков нераспушенных волокон в единице объема распущенной волокнистой массы.

Эти же параметры характеризуют и непрерывный роспуск за исключением времени роспуска. Одним из важнейших параметров, характеризующих процесс роспуска, а для периодического процесса в какой-то степени и окончание роспуска, является концентрация волокнистой массы в ванне гидроразбивателя.

Существует система автоматического управления роспуском, которую можно применять для роспуска полуфабрикатов и брака с бумагоделательной и картоноделательной машины (БДМ и КДМ) (3).

Суть этого способа управления заключается в том, что измеряют уровень в центре ванны (или по вертикали над краем роторного длюка) и на периферии и в зависимости от их разности изменяют расход сырья и корректируют расход оборотной воды.

При работе гидроразбивателя в результате вращения массы в ванне образуется воронка. Перепад уровней в ванне в центре и на периферии характеризует форму свободной поверхности воронки. Форма свободной поверхности воронки или перепад уровней является более точным показателем концентрации. Известно, что качество роспуска сырья при постоянной скорости вращения ротора зависит от степени загрузки гидроразбивателя или концентрации волокнистой массы в ванне. С увеличением загрузки гидроразбивателя перепад уровней уменьшается, а концентрация увеличивается.

Перепад уровней в ванне гидроразбивателя, т.е. концентрация волокнистой массы, регулируется изменением расхода разбавляющей оборотной воды по пропорционально-интегральному закону, уровень в ванне регулируется изменением расхода отводимой и рециркуляционной волокнистой массы по пропорциональному закону. Одновременно сигнал перепада уровней через позиционное регулирующее устройство и магнитный пускатель управляет включением и выключением электродвигателя привода транспортера подачи сырья. Таким образом обеспечивается отключение подачи сырья на роспуск при достижении минимально допустимого перепада уровней (максимальной допустимой концентрации волокнистой массы в ванне).

В случае забывания оита и превышения уровня на периферии максимального значения позиционное регулирующее устройство отключает автоматику регулирования уровня и сигнализирует оператору об аварийном положении на объекте.

Управление процессом роспуска макулатуры, поступающей в кипах или россыпью, производится по следующей схеме (рис. 85) [2]. Измеряют массовые расходы сырья и оборотной воды, определяют их соотношение (2) и расход воды изменяют в зависимости от соотношения и уровня в деишфере (1) (переливном ящике).

Такая система управления позволяет повысить качество роспуска сырья, так как она обеспечивает заданную концентрацию, косвенно определяемую по соотношению расходов сырья и воды.

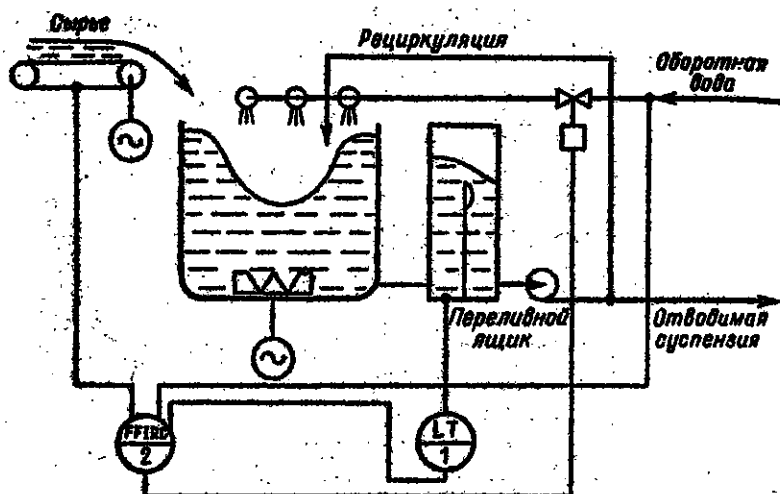


Рис.85. Схема автоматизации розпуска сырья в гидроразбавителе.

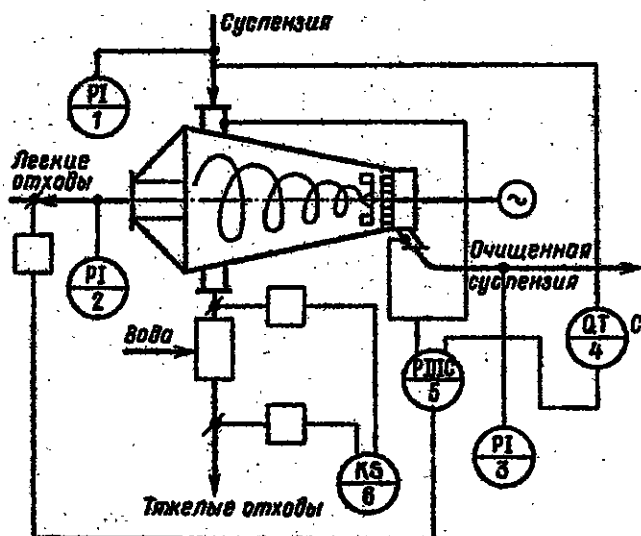


Рис.86. Схема автоматизации сортирующего гидроразбавителя.

Сортирующие гидроразбиватели предназначены для очистки и дороспуска суспензии после основного гидроразбивателя. Система автоматического управления сортирующим гидроразбивателем работает следующим образом [3] (рис.86). Измеряется разность давления  $\Delta p$  между входом суспензии и выходом очищенной суспензии за ситом, измеряется концентрация волокнистой суспензии на входе (4), и выпуск легких отходов регулируется (изменяется) (5) в зависимости от отклонений этих параметров от заданных значений. При достижении определенного значения  $\Delta p_{\text{max}}$  позиционный регулятор обрабатывает и открывает заслонку на трубопроводе легких отходов. При снижении  $\Delta p$  до  $\Delta p_{\text{min}}$  заслонка закрывается.

При увеличении концентрации относительно заданной корректирующий сигнал на регулирующем блоке уменьшается, а при уменьшении концентрации увеличивается. В этом случае также уменьшается или увеличивается сигнал на выходе сумматора при постоянной разности давлений. Эта коррекция вводится в систему для того, чтобы скомпенсировать изменение разности давлений при изменении концентрации на входе при неизменном количестве легких отходов, так как, например, при увеличении концентрации суспензии на входе увеличивается гидравлическое сопротивление при прохождении через сито и разность давлений  $\Delta p$  увеличивается. Тяжелые отходы удаляются с помощью реле времени, управляющего открытием и закрытием исполнительных механизмов (6). В системе предусмотрен автоматический контроль давления в трубопроводах (1-3).

Эта система управления обеспечивает повышение отенени очистки макулатурной массы от загрязнений и уменьшает потери хорошего волокна.

Размол является важнейшим этапом подготовки массы для БДМ или КДМ и производится на дисковых или конических мельницах. Для обеспечения стабильности качества массы (суспензии) после размола существуют следующие АСР размольных аппаратов:

- по мощности приводного электродвигателя;
- по мощности приводного электродвигателя с коррекцией по расходу суспензии;
- по удельному расходу энергии с коррекцией по расходу суспензии;





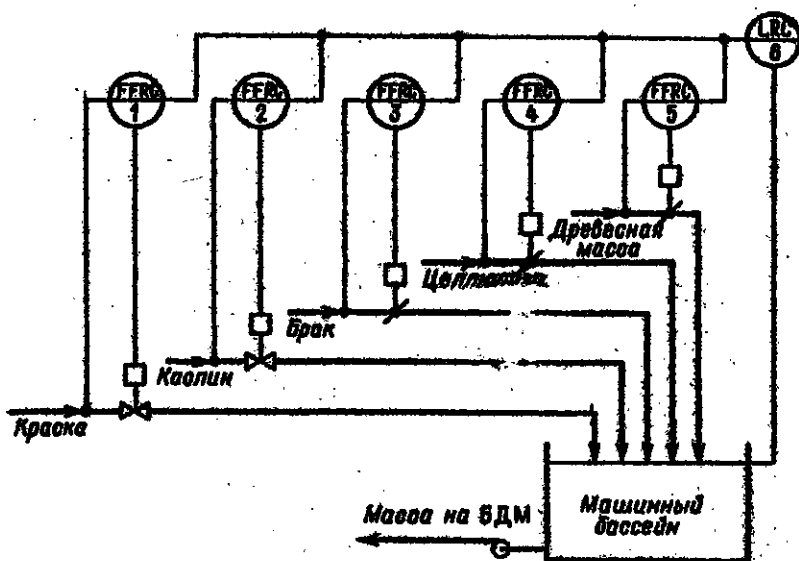


Рис. 88. Схема автоматизации соответствия композиции бумажной массы.

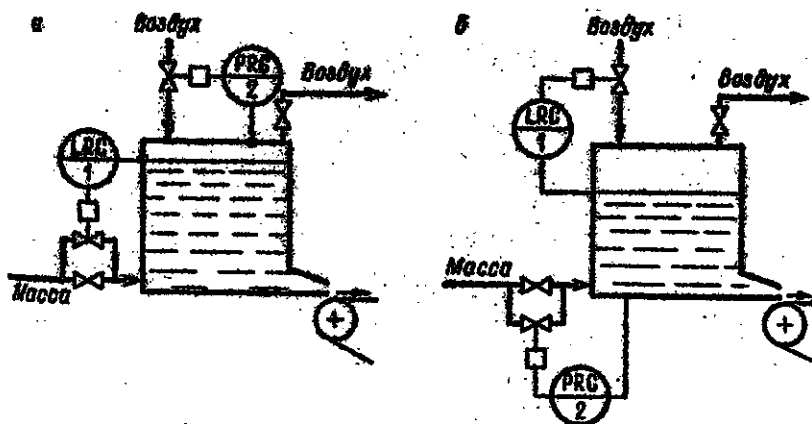


Рис. 89. Схема автоматизации напуска бумажной массы на сетку БДМ.

Применяются и другие схемы автоматизации составления композиции бумажной массы.

Напуск бумажной массы на сетку БДМ производится с помощью напускных устройств (напорных ящиков) закрытого и открытого типов. На рис.89 представлены схемы автоматизации напорного ящика закрытого типа. В напорном ящике закрытого типа (рис.89, а) уровень массы регулируют изменением расхода ее в напорный ящик (1) и давления воздушной подушки воздействием на расход воздуха (2).

На рис.89, б приведена схема автоматизации, отличающаяся большей устойчивостью и более высоким качеством регулирования по сравнению со схемой, представленной на рис.89, а. Здесь регулирование уровня бумажной массы в напорном ящике осуществляется воздействием на расход воздуха (1), а расход массы в напорный ящик изменяют в зависимости от общего напора (2).

В напорных ящиках открытого типа регулируют только уровень бумажной массы.

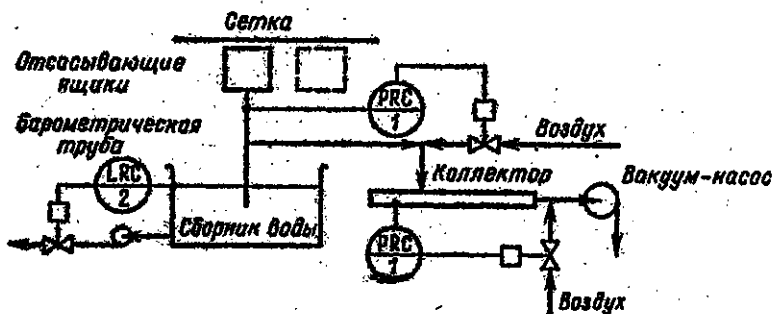


Рис.90. Схема автоматизации обезвоживания бумажного полотна на отсасывающих ящиках.

Обезвоживание бумажного полотна производится на отсасывающих ящиках и прессах. Схема автоматизации обезвоживания на отсасывающих ящиках приведена на рис.90. Основным регулируемым параметром является вакуум в отсасывающих ящиках и коллекторе. Регулирование вакуума производится по методу ухудшения вакуума путем измене-

ния расхода атмосферного воздуха (1). Кроме того, регулируется уровень в сборнике оборотной воды (2).

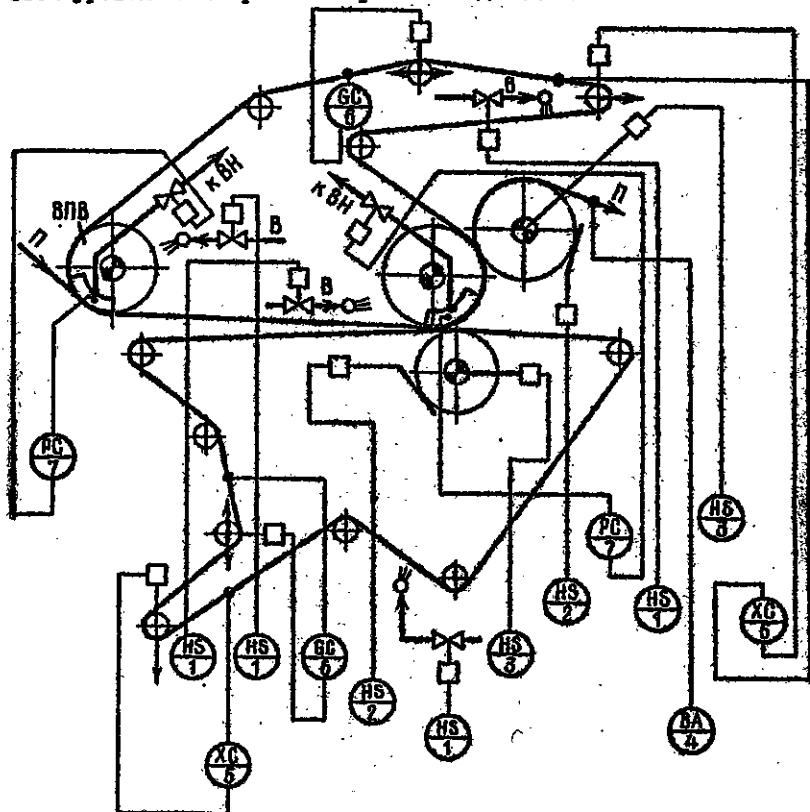


Рис. 91. Система автоматизации обезвоживания бумажного полотна на прессах.

Процесс прессования является одним из этапов механического обезвоживания бумажного или картонного полотна. Здесь обезвоживание полотна происходит как на обычных прессах, так и отсаживающих. Эффективность процесса обезвоживания зависит от состояния сукна и валов, которое стабилизируется с помощью соответствующих автоматических систем (рис. 91). На рис. 91 использованы обозначения: В - вода на опрыски, ВН - вакуумный насос; П - бумажное или картонное полотно; ВНВ -

вакуум-пересасывающий вал; 1 - СДУ (система дистанционного управления) работой сирискоков; 2 - СДУ положением шаберов; 3 - СДУ прижимом и вылетчиванием валов; 4 - АСР (автоматическая система сигнализации) обрыва полотна; 5 - АСР натяжения сукна; 6 - АСР положения сукна; 7 - АСР вакуума в камерах отсасывающих валов.

В случае применения на БДМ турбовоздуходувки для создания вакуума отсасывающие ящики и отсасывающие валы разбиваются на группы в зависимости от разрежения, и каждая группа подключается к соответствующей ступени турбовоздуходувки.

**Сушка бумажного полотна.** Основная цель автоматизации сушки бумажного полотна в сушильной части БДМ состоит в регулировании температурного режима сушки и получения бумаги оптимальной и равномерной влажности. Схема автоматизации контактной сушки бумажного полотна приведена на рис. 92. Работа системы управления контактной сушки должна быть согласована с решением основной задачи, которая заключается в обеспечении наиболее низкого отношения расхода пара к расходу удаленной воды из полотна бумаги.

Все сушильные цилиндры разбиваются на несколько групп, чтобы между паровыми коллекторами, а также между паровым коллектором и коллектором конденсата каждой сушильной группы был соответствующий перепад давления. Основными регулируемыми параметрами являются давление пара, перепад давления, уровни в водоотделителях, влажность и масса  $1 \text{ м}^2$  бумаги.

Давление пара в коллекторе каждой сушильной группы и в главном паровом коллекторе регулируется с помощью локальных АСР (1). Перепад давления между паровым коллектором и коллектором конденсата каждой сушильной группы регулируется изменением расхода пара, перепускаемого из водоотделителей (2). В водоотделителях регулируются уровни конденсата (3). Регулирование влажности бумаги производится по каскадной схеме: выход с регулятора влажности (4) используется в качестве задания регулятору давления пара, поступающего в основную сушильную группу (5). Масса  $1 \text{ м}^2$  бумаги регулируется (6) путем изменения расхода бумажной массы перед смесительным насосом.

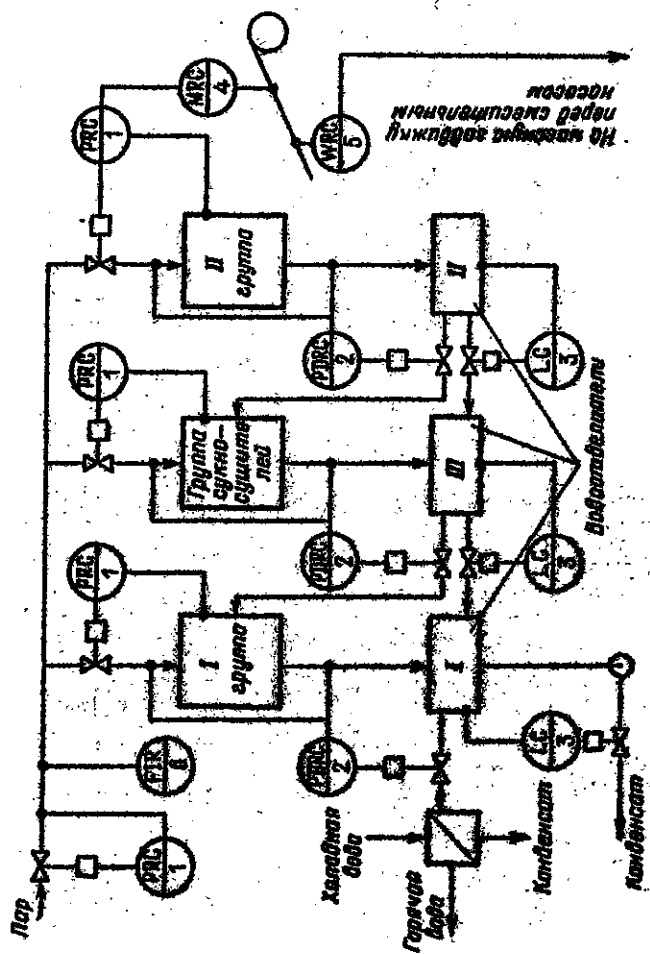


Рис. 92. Схема автоматизации контурной системы буржуйного отопления.

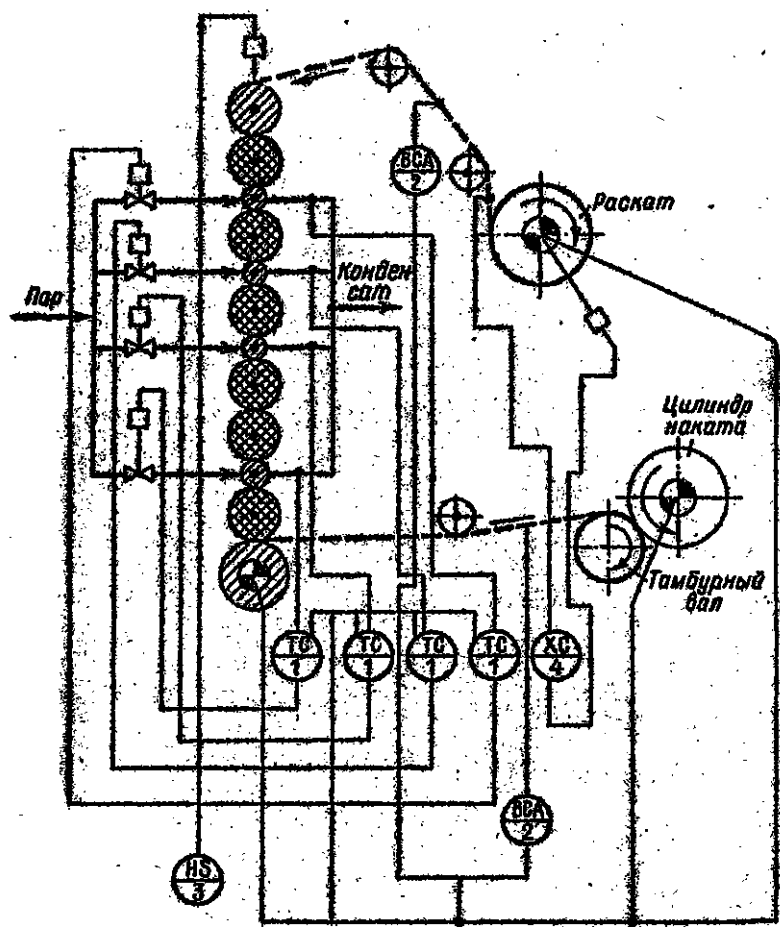


Рис. 93. Схема автоматизация суперкалендрования бумажного полотна.

Общий расход пара на сушку контролируется АСК расхода (8).

Каландрирование полотна бумаги и картона. Для отделки различных видов бумаги и картона применяют каландры и суперкаландры. При каландрировании бумага подвергается давлению, трению, тепловому воздействию и увлажнению. Машинный каландр устанавливается между сушильной частью и накатом и предназначен для разглаживания бумаги и придания ей гладкости. Для уплотнения влажной бумаги и придания ей гладкости в середине сушильной части или перед последней сушильной группой устанавливается мокрый (полусухой) каландр. Для уплотнения картона предназначен уплотнительный каландр, состоящий из двух обогреваемых паром или горячей водой ведомого и ведущего валов. Известны и другие машинные каландры.

Вследствие того, что машинное каландрирование не обеспечивает достаточно высокие гладкость и лоск, большинство плоских видов бумаги для печати, а также многие технические виды бумаги и картона подвергаются суперкаландрированию вне БДМ или КДМ.

Машинные каландры оснащаются СДУ подъема валов, СДУ дополнительного прижима (3'), АСР температуры обогреваемых или охлаждаемых металлических валов (1) и АСС (автоматической системой сигнализации) обрыва полотна.

Суперкаландры оснащаются дополнительно СДУ раскатом, накатным устройством, подъемниками и другими механизмами, АСР натяжения полотна на раскате (4), АСС обрыва полотна на раскате и накате и связанная с ней автоматическими системами блокировки узлов (2) (рис. 93).

По сигналу АСС обрыва срабатывают тормозные системы на раскате, накате и батареях валов, системы механизма прижима и быстрого разведения валов. Подача пара в валы автоматически прекращается при обрывах полотна и аварийных остановках. Для регулирования натяжения полотна на раскатах применяют дисковые пневматические тормоза с датчиками натяжения.

Для обеспечения определенной заданной температуры валов независимо от периодичности работы суперкаландра и других факторов в последнее время применяют тепловые станции с исполь-

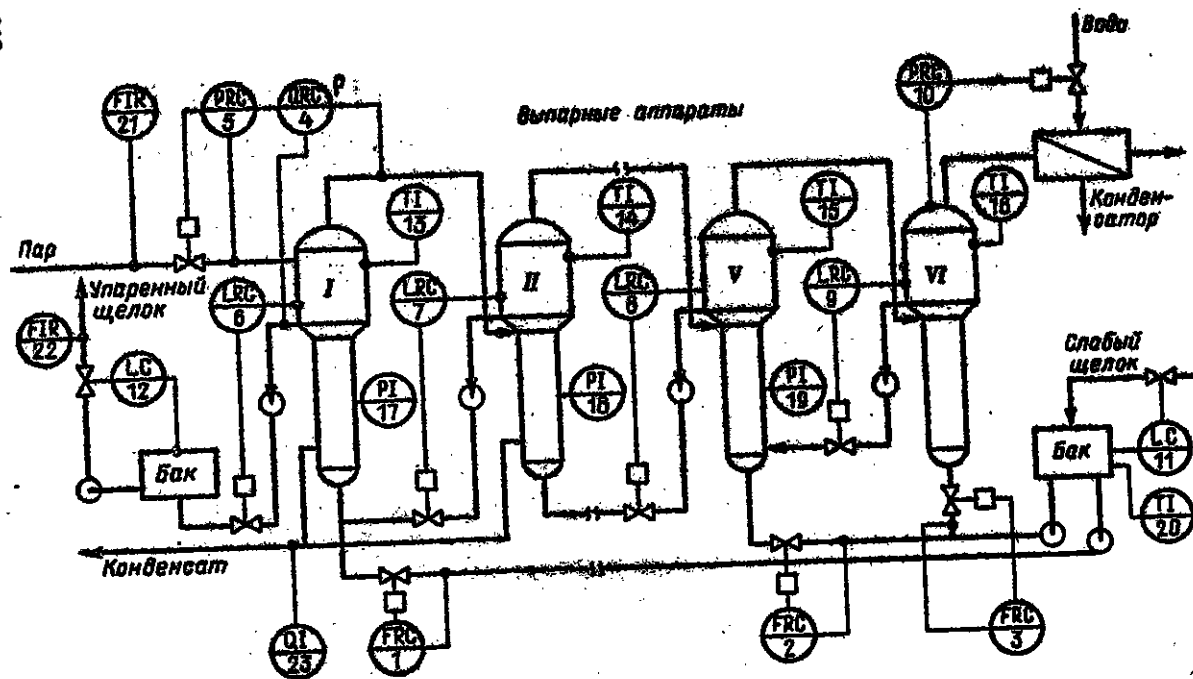


Рис. 94. Схема автоматизации выпаривания щелока.



зованием различных теплоносителей (воды, перегретой воды, пара и перегретого масла). Например, управление температурой валов, обогреваемых тепловой станцией с водяным обогревом, производится следующим образом. Насос через холодильник и нагреватель подает определенное количество воды в вали суперкаландра. Фактическую температуру воды, измеренную термометром сопротивления, терморегулятор сравнивает с заданной и выдает сигналы регулирующим клапанам, установленным у нагревателя и холодильника. Регулирующие клапаны для пара и воды плавно регулируют поступление теплоносителей, и в систему вводится или отводится из нее такое количество тепла, которое необходимо для обеспечения оптимального теплового режима каландровых валов.

### 3.2.3. Автоматизация процессов регенерации химикатов.

Задачей регенерации является возврат щелочи из черного щелока с целью повторного использования ее в производстве. Регенерация щелочи достигается выпариванием, сжиганием и каустизацией черного щелока, а регенерация извести — обжигом известкового шлама, получаемого после каустизации.

Выпаривание черного щелока. Выпарная станция состоит из теплообменных выпарных корпусов. Свежий греющий пар подается в межтрубное пространство первого выпарного аппарата. Остальные последовательно включенные выпарные аппараты обогреваются вторичным или соковым паром предыдущих аппаратов. На рис. 94 приведена схема автоматизации процесса выпаривания черного щелока в многокорпусной выпарной станции. Для упрощения схемы третий и четвертый корпусы не показаны.

Входными переменными процесса выпаривания черного щелока в выпарной станции являются: температура, плотность и количество подаваемого на выпарку слабого черного щелока, а также расход пара на выпаривание.

Выходными переменными процесса являются: плотность упаренного щелока, производительность выпарной станции по испаренной воде, вакуум после последнего выпарного корпуса.

Слабый щелок подается к *II*, *V* и *I* корпусам из бака слабого щелока. Нагрузка на корпусы устанавливается с помощью АСР расхода щелока (1-3). Плотность упаренного щелока ре-

гулируется косвенно, по величине температурной депрессии. Под депрессией понимается превышение температуры кипения выпариваемого щелока по отношению к температуре выделяющегося из него вторичного пара. Измеритель плотности состоит из электронного автоматического моста, измеряющего разность температур, двух термометров сопротивления, из которых один установлен на линии упаренного щелока, а второй - на линии паров вскипания этого щелока. АСР плотности щелока построена по каскадному принципу: выход регулятора плотности (4) используется в качестве задания регулятору давления греющего пара (5).

Важное значение имеет регулирование уровня щелока в выпарных аппаратах (8-9). При высоком уровне щелока возрастает гидростатическое давление, возможны загрязнения конденсата щелоком и его потери в результате переброса вместе с вторичным паром в последующий выпарной аппарат. Вакуум в последнем выпарном аппарате (10) регулируется автоматически изменением расхода охлаждающей воды, подаваемой в конденсатор вторичного пара. Регулируются уровни в баках слабого и упаренного щелоков (11-12). Контролируются температура (13-16) и давление (17-19) в выпарных корпусах, температура слабого щелока (20), расходы греющего пара (21) и упаренного щелока (22).

Конденсат от первого и второго корпусов используется для питания паровых котлов. Для предупреждения попадания щелока в конденсат устанавливается сигнализатор загрязненности конденсата (23).

**Сжигание черного щелока.** Из выпарной установки черный щелок поступает на сжигание в содоре-генерационный котел (СРК). Черный щелок, содержащий 52-56% сухих веществ в подогретом состоянии, насосом через форсунки подается на сжигание в топку.

На рис.95 приведена схема автоматизации процесса сжигания черного щелока в СРК - энерготехнологическом агрегате, предназначенном для сжигания черного щелока и получения пара.

Выходными переменными процесса сжигания в СРК являются: количество, влажность, зольность, температура плавления плава, количество летучих веществ, количество добавляемого сульфата для восполнения потерь серы, соотношение первичный воздух - вторичный воздух по отношению к абсолютно сухим веществам, температура в топке и др.

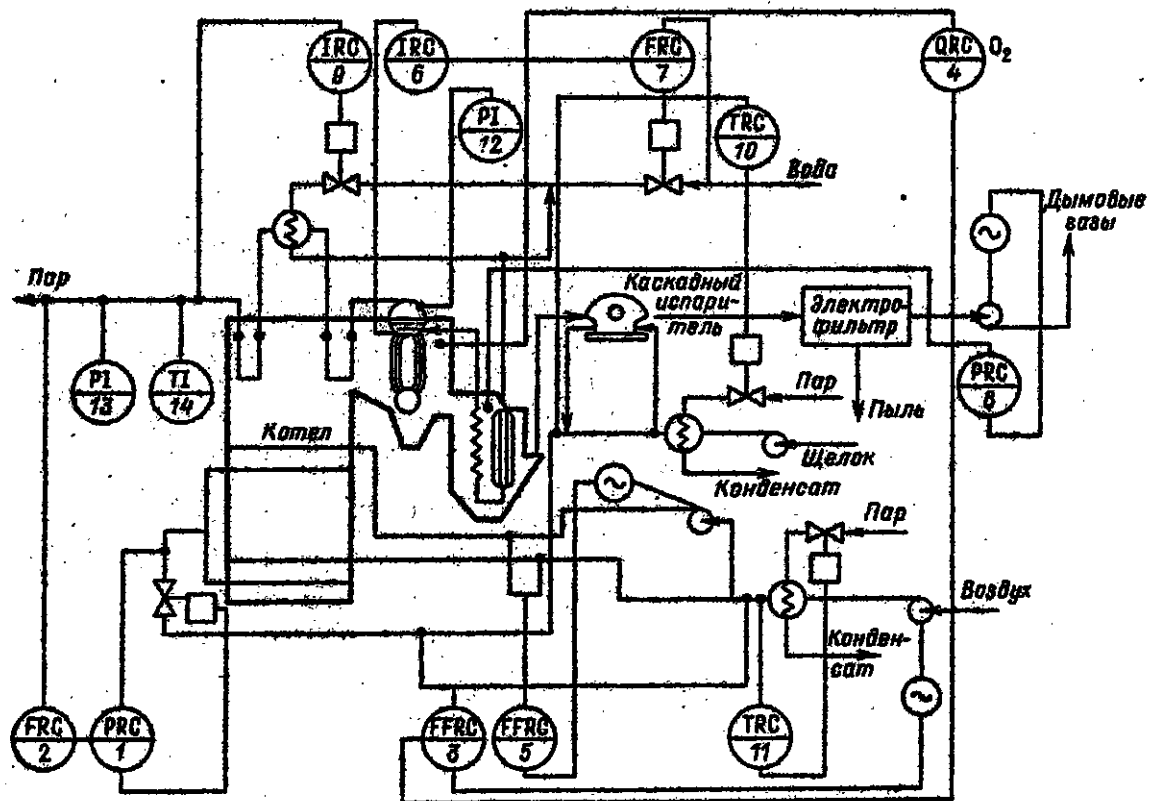


Рис. 95. Схема автоматизации скиминга черного дымка.

Выходными переменными процесса являются сульфидность плава, количество щелочи в плаве, коэффициент избытка воздуха при сжигании щелока, количество и параметры пара.

Задачей автоматического регулирования СРК является поддержание такого соотношения между количествами топлива, воздуха и воды, подаваемых в котел, при котором в любой момент времени паропроизводительность агрегата соответствовала бы нагрузке, т.е. количеству пара, отбираемого потребителем. При этом необходимо поддерживать давление и температуру пара на оптимальных значениях.

В общем случае автоматическое регулирование процесса горения в котлах осуществляется тремя контурами регулирования: контуром регулирования давления пара и нагрузки котла, контуром регулирования экономичности сжигания топлива и контуром регулирования разрежения в топке котла.

Регулирование расхода сжигаемого черного щелока осуществляется с помощью АСР (1), которая стабилизирует давление в трубопроводе перед форсунками. Регулятор нагрузки (2) изменяет подачу топлива в соответствии с изменением расхода пара из котла.

Экономичность процесса горения регулируется по соотношению расходов топлива (щелока) и воздуха (3) с коррекцией по содержанию кислорода в дымовых газах (4). Расход вторичного воздуха регулируется с помощью АСР (5) соотношения расходов первичного и вторичного воздуха путем воздействия на направляющие аппараты вентилятора вторичного воздуха.

Положение уровня воды в барабане котла зависит от нарушения баланса между притоком воды и расходом пара, от изменения паросодержания пароводяной смеси циркуляционного контура и от парообразования в экономайзере. Уровень в барабане регулируется по каскадной схеме: выход регулятора уровня (6) используется в качестве задания контуру регулирования расхода воды (7).

Разрежение в топке котла регулируется с помощью АСР (8) путем воздействия на направляющие аппараты дымососа.

Температура перегретого пара в пароперегревателе регулируется изменением расхода пароводяной смеси в циркуляционном

контуре. В подогревателях регулируется температура шелока (10) и воздуха (11).

Контролируются и сигнализируются давление в барабане котла (12), давление (13) и температура (14) пара.

В СРК предусматриваются следующие блокировки: а) при аварийном отключении всех работающих дымоходов должны отключаться дутьевые вентиляторы, насосы подачи основного и вспомогательного топлива; б) при повышении или понижении давления вспомогательного топлива выше или ниже предельных величин должна отключаться подача вспомогательного топлива; в) при аварийном отключении всех работающих дутьевых вентиляторов должна прекращаться подача основного и вспомогательного топлива; при отключении транспортной системы электрофильтров должно отключаться напряжение с камер электрофильтров; д) при погасании факела вспомогательного топлива должна отключаться подача вспомогательного топлива.

На щите управления СРК устанавливается сигнализация предельно допустимых уровней воды в барабане котла, понижения давления питательной воды, повышения температуры перегретого пара, понижения плотности черного шелока, повышения концентрации зеленого шелока, прекращения поступления воды на охлаждение леток, повышения температуры масла в подшипниках дымоходов и вентиляторов, понижения давления первичного воздуха, понижения давления вспомогательного топлива, остановки транспортной системы электрофильтров, повышения температуры воды, идущей на охлаждение леток.

**Каустизация зеленого шелока.**  
При каустизации зеленый шелок из карбоната натрия превращается в каустическую соду — едкий натр (рис. 96).

Входными переменными процесса каустизации зеленого шелока являются: количество активной  $\text{CaO}$  и наличие примесей в извести, расход извести на каустизацию, концентрация зеленого шелока и др. Выходными переменными процесса являются: количество получаемого белого шелока, его концентрация, температура зеленого шелока перед гашением.

Расход зеленого шелока, поступающего из растворителя шлама СРК в осветлитель, контролируется расходомером (1). Ос-

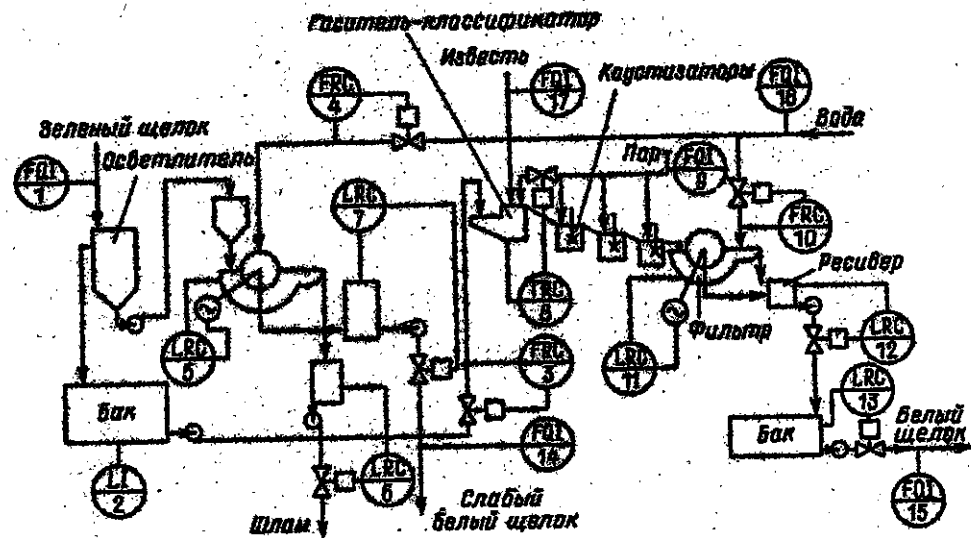


Рис. 96. Схема автоматизации процесса каустизации зеленого щепока.

ветленный зеленый щелок поступает в бак, в котором контролируется уровень (2). Расход зеленого щелока из бака регулируется с помощью АСР (3). Расход механически очищенной воды на промывку зеленого щелока от шлама в фильтре Эймко-Белт поддерживается постоянным (4). Регулируются уровни в ванне фильтра (5), бассейне шлама (6) и баке олябого белого щелока (7).

На процесс каустизации влияют концентрация, состав и температура зеленого щелока, а также количество извести, участвующей в реакции. От значения температуры зависит продолжительность процесса: при снижении температуры от 100 до 60°C время реакции увеличивается в десятки раз. Температура процесса каустизации регулируется изменением расхода пара (8). Общий расход пара контролируется расходомером (9).

Регулируется расход воды на промывку белого щелока от шлама на фильтре Эймко-Белт (10) и уровень белого щелока в фильтре (11), ресивере (12) и баке белого щелока (13). Контролируется расход белого щелока в растворитель шлама (14) и на варку (15), расход воды на промывку (16) и расход извести на каустизацию (17).

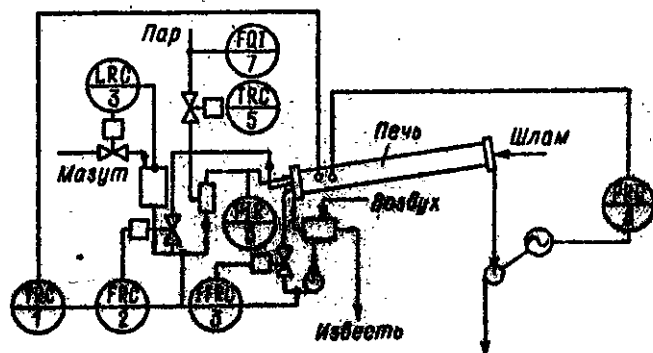


Рис. 97. Схема автоматизации процесса регенерации извести.

Регенерация извести из каустизационного шлама производится во вращающейся печи, работающей на жидком топливе — мазуте (рис. 97).

Входными переменными процесса регенерации (обжига) известны являются: расход и влажность шлама, расход и теплотворная способность топлива, продолжительность обжига. Выходными переменными процессами являются: количество и качество обожженной извести, давление и температура в печи.

Одним из основных регулируемых параметров является температура в печи (1), которая поддерживается путем воздействия на контур регулирования расхода мазута (2) на линии возврата. Регулируется уровень мазута в расходном баке (3). Для регулирования процесса горения стабилизируется соотношение между расходами сжигаемого мазута и воздуха (4). Перед подачей мазута в печь он подогревается в теплообменнике паром; температура мазута регулируется с помощью АСР (5). Контролируется давление мазута (6) и расход пара (7).

Давление в печи поддерживают путем изменения расхода дымовых газов из пылевой камеры печи (8). Кроме того, контролируется температура по длине известерегенерационной печи, используются устройства сигнализации и дистанционного управления.

### 3.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД И ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

3.3.1. Автоматизация очистки сточных вод. Сточные воды, содержащие органические и неорганические вещества, являются источниками загрязнения водоемов. Органами санитарной инспекции установлены предельные значения следующих показателей сточных вод при выпуске их в водоемы: БПК, pH, содержания растворенного кислорода, мутности и цветности.

Различают внутрицеховые методы очистки сточных вод и методы очистки общего стока. Далее рассматриваются вопросы автоматизации процессов очистки сточных вод общего стока.

Для обеспечения требуемых показателей сточные воды общего стока подвергаются механической, биологической и химической очистке на специальных очистных сооружениях. Схема очистки сточных вод приведена на рис. 98.

Сточные воды сначала поступают на первичные отстойники (1), предназначенные для удаления из сточных вод взвешенных



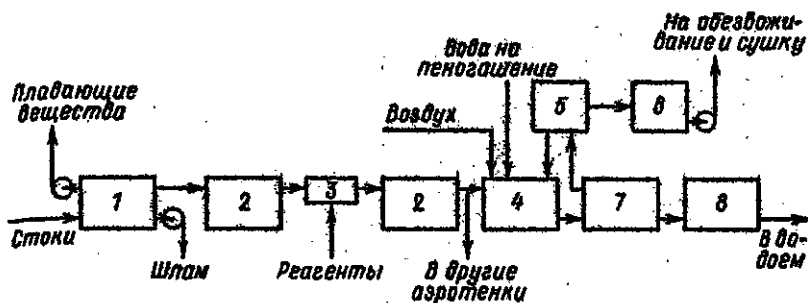


Рис. 98. Схема очистки сточных вод.

и плавающих частиц. Затем в смесителях (3) и усреднителях (2) производится нейтрализация сточных вод и сглаживание pH. Биологическая очистка сточных вод осуществляется в аэротенках (4), в которых стоки обрабатываются активным илом при непрерывной аэрации для снижения содержания в них органических соединений и увеличения количества растворенного кислорода. Подача воздуха в аэротенки производится от воздуходувной станции. Избыточный ил по иловым каналам (5) собирается в илоуплодителях (6) и далее направляется на обезвоживание и сушку. Во вторичных отстойниках (7) происходит осаждение ила и осветление очищенной воды. Для более глубокой очистки воду после вторичных отстойников направляют на химическую очистку (8), где ее обрабатывают глиноземом и полиакриламидом и пропускают через песочные фильтры.

Основная задача в области очистки сточных вод заключается в разработке новых и максимальном повышении эффективности существующих методов очистки, снижающих себестоимость обработки воды и увеличивающих объем воды в системах замкнутого водоснабжения. Одним из путей достижения этой цели является автоматическое управление процессами очистки сточных вод.

Механическая очистка сточных вод. Для нормальной работы ступени биологической очистки сточных вод их необходимо очистить от взвешенных частиц. Для этой цели стоки пропускают через первичные отстойники, являющиеся сооружениями механической очистки сточных вод. Эти отстойники оснащены илоскребами и автоматическими устройствами

(желобами) для сбора плавающих частиц. На рис.99 приведена схема автоматизации очистки сточных вод в первичных отстойниках.

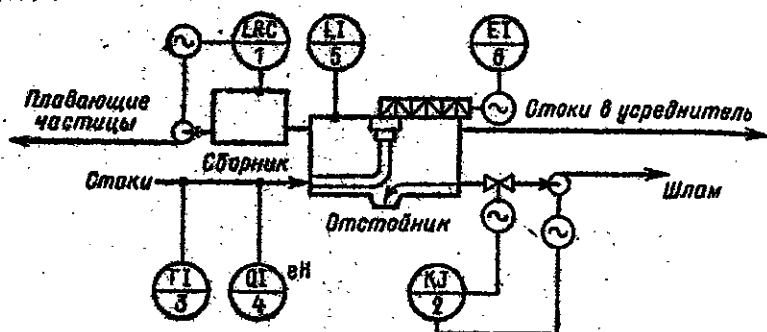


Рис.99. Схема автоматизации очистки сточных вод в первичном отстойнике.

Для контроля за работой первичных отстойников требуется измерять вращающий момент на валу ферм илоскребов и уровень ила. Для этого измеряют нагрузку приводных двигателей ферм (8). Для сигнализации уровня используют фотоэлектрические сигнализаторы СВ-42 или СВ-101 (5). По мере накопления осадка по сигналу от КЭП ил откачивается специальным насосом (2). Плавающие частицы удаляют автоматически через специальный карман, который при передвижении фермы на определенное время механически погружается ниже уровня воды в отстойник. По мере накопления в сборнике плавающие частицы откачиваются (1). Контролируются также температура (3) и ОВП (4) поступающих стоков.

Химическая очистка сточных вод производится в усреднителях и ершовых смесителях. Схема автоматизации приведена на рис.100.

Важнейшим параметром, подлежащим контролю и регулированию в усреднителях, является величина pH стоков, колебания которой достигают  $\pm 3$  pH. Нормальная же жизнедеятельность микроорганизмов активного дна, являющаяся основой биологической очистки, возможна при pH = 6,0 - 7,5. Кислые стоки нейтрализуют известковым молоком, а щелочные - серной кислотой. Дозировку реагентов осуществляют с помощью АСР величины pH (3).

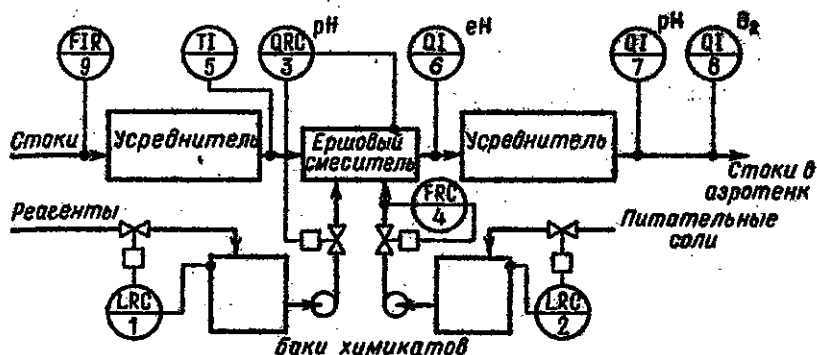


Рис.100. Схема автоматизации химической очистки сточных вод в усреднителях и ершовом смесителе.

Необходимо измерять температуру стоков (5), так как при температуре ниже 7-8°C биологическая очистка прекращается. Для измерения температуры применяют термосопротивления.

Очень важным параметром является расход стоков (9), так как от нагрузки станции биологической очистки зависит дозировка питательных солей, в частности аммиачной воды. При наличии напорных трубопроводов такое измерение проводят с помощью диафрагм. В случае подачи стоков через лотки измеряют уровень в лотке и рассчитывают расход стоков (в м<sup>3</sup>/с) по формуле

$$Q = bHv, \quad (3.4)$$

где  $b$  - ширина лотка, м;  $H$  - уровень, м;  $v$  - средняя скорость, м/с.

Питательные соли (растворы суперфосфата, сульфата аммония или аммиачная вода) добавляют в сточную воду перед аэротенком для обеспечения жизнедеятельности микроорганизмов. Расход питательных солей устанавливают с помощью АСР (4) по соотношению с расходом стоков. Для измерения расхода питательных солей применяют ротаметры или электромагнитные расходомеры.

Уровни в баках химикатов регулируются с помощью АСР (1, 2) по расходу химикатов в баки.

Контролируются также ОВП стоков после смесителя (6), pH и концентрация растворенного кислорода перед аэротенками (7, 8).

**Биологическая очистка сточных вод.** Схема автоматизации биологической очистки сточных вод приведена на рис. 101. Основным сооружением биологической очистки сточных вод является аэротенк. Для поддержания заданного режима биологической очистки в аэротенках необходимо измерять расход воды (1, 2), или (3) и воздуха. Расход воды через водослив определяется высотой уровня воды над порогом водослива; этот уровень измеряется с помощью пьезометрической трубки.

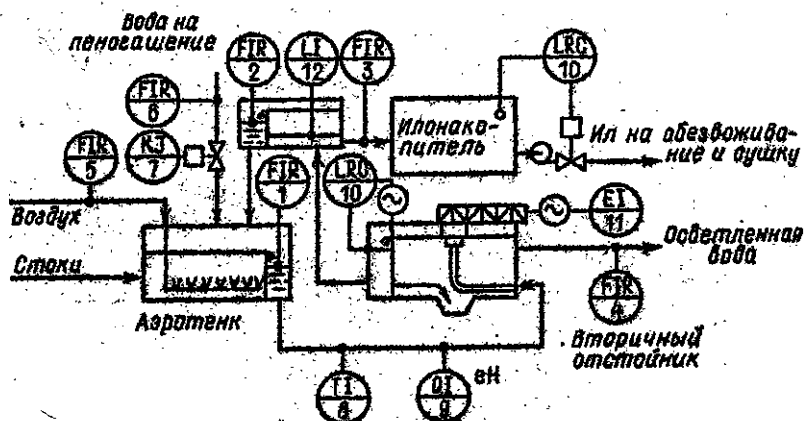


Рис. 101. Схема автоматизации биологической очистки сточных вод в аэротенке и вторичном отстойнике.

Для контроля за расходом воздуха, подаваемого на аэрацию в каналы аэротенков, устанавливают расходомеры (5). Для гашения пены, образующейся при работе аэротенков, подается вода, расход которой измеряется с помощью диафрагмы (6). Вода может подаваться периодически по мере накопления пены с помощью командного прибора (7). Контролируются также температура (8), ОВП (9) иловой смеси из аэротенка и уровень воды (12).

Иловая смесь из аэротенков поступает во вторичные отстойники, предназначенные для осветления воды. Важнейшим па-

раметром является уровень, так как при повышении уровня ила возрастает его унос с водой, а при снижении уровня уменьшается концентрация ила, возвращаемого в аэротенки. Для этой цели используют АСР уровня ила (10), основанную на регулировании высоты переливного порога (шандора) на линии выпуска ила из отстойника. В качестве датчика уровня ила используют фотореле, например, СУФ-42, спускаемое в отстойник на определенную глубину на тросе.

Кроме регулирования уровня ила предусмотрено измерение нагрузки привода фермы (11) и расхода осветленной воды (4).

**3.3.2. Автоматизация очистки газовых выбросов.** Промышленные выбросы, загрязняющие атмосферу, могут содержать твердые и жидкие частицы, а также вредные газообразные компоненты. Процессы очистки выбросов от твердых или жидких частиц основаны на свойствах аэрозолей (пыли, дыма, тумана), закономерностях их движения и осаждения. Изучение процессов очистки выбросов от газовых компонентов связано с теорией массообмена, которая рассматривает условия равновесия фаз и закономерности поглощения газовых компонентов.

**Очистка газовых выбросов от пылевых частиц.** Для очистки газопылевых выбросов от пыли используются пылеулавливающие аппараты следующих типов: сухие, фильтрующие, мокрые и электростатические. Схему автоматизации этого процесса рассмотрим на примере мокрой очистки газов.

Мокрые пылеулавливающие аппараты в зависимости от состояния поверхности осаждения разделяются на три типа. К первому типу относятся насадочные скрубберы, мокрые циклоны и др. В этих аппаратах поверхностью осаждения служит пленка жидкости, специально создаваемая на их внутренних стенках, насадке и т.д. Частицы пыли, осаждаемые на пленке жидкости, выводятся из газового потока. Ко второму типу относятся барботажные и пенные аппараты, в которых осаждение происходит на поверхности пузырьков, образованных при движении газов через слой жидкости. К третьему типу относятся полные скрубберы Вентури (турбулентные аппараты Вентури - ТАВ), струйные газопромыватели (эжекторные скрубберы или струйные аппараты)

и т.д. В аппаратах этого типа поверхностью осаждения служат капли орошающей жидкости, распыленной в объеме аппарата.

Эффективность работы мокрых пылеулавливающих аппаратов зависит от следующих основных факторов: конструкции аппарата, характеристик пылевых частиц, скорости потоков газов, температуры газов и орошающей жидкости, удельного расхода орошающей жидкости.

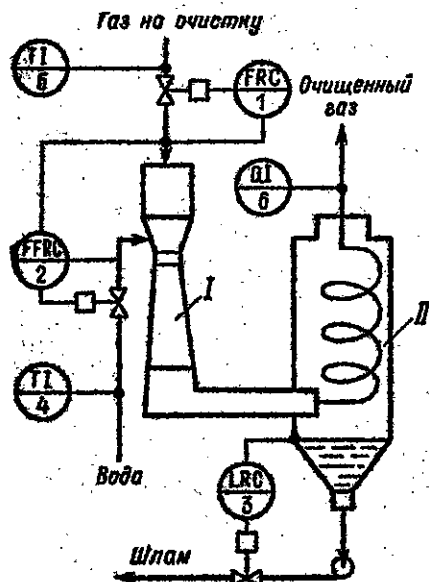


Рис. 102. Схема автоматизации очистки газопыльных выбросов в турбулентном аппарате Вентури.

Вследствие высоких относительных скоростей происходит интенсивное столкновение пылевых частиц с каплями под действием сил инерции и улавливание частиц каплями. Капли отделяются от потока газов в циклоне-каплеуловителе под действием центробежных сил.

Основными регулируемыми параметрами являются скорость газа и удельный расход орошающей жидкости. Скорость газа определяет нагрузку ТАВ и регулируется с помощью АСР расхода газа

В качестве примера рассмотрим схему автоматизации очистки газопыльных выбросов в турбулентном аппарате Вентури (рис. 102). Он состоит из трубы Вентури (I) и циклона-каплеуловителя (II). Труба Вентури имеет три составные части: конфузор, горловину, диффузор. Струи орошающей жидкости, выходящей в объем конфузора, испытывают воздействие газового потока, который имеет более высокую скорость на входе в горловину. Ввиду значительной разности между скоростями движения газа и жидкости струи дробятся на капли.

на входе в аппарат (1). Дозировка орошающей жидкости (воды) осуществляется в зависимости от расхода газа с помощью АОР соотношения расходов (2). Регулируется уровень жидкости в каплеуловителе путем изменения расхода жидкости на выходе (3). Контролируется температура газа и орошающей жидкости (4,5), а также концентрация дыма (степень очистки) (6).

Очистка газовых выбросов от вредных газообразных компонентов. Для очистки промышленных газовых выбросов от вредных газообразных компонентов используют различные методы: абсорбцию, адсорбцию, химическое превращение вредных газообразных компонентов в безвредные соединения.

Абсорбция представляет собой процесс поглощения газов жидким поглотителем.

Адсорбция - процесс поглощения газа поверхностью твердого пористого вещества.

Химическое превращение вредных газообразных компонентов в безвредное соединение производится обычно окислением кислородом воздуха или хлором.

Рассмотрим автоматизацию очистки газовых выбросов в абсорберах.

Абсорбция относится к массообменным процессам. Массообмен в абсорбционных аппаратах происходит на границе раздела фаз. По характеру поверхности раздела абсорберы классифицируются следующим образом:

1) Поверхностные (пленочные) абсорберы. Поверхностью раздела фаз

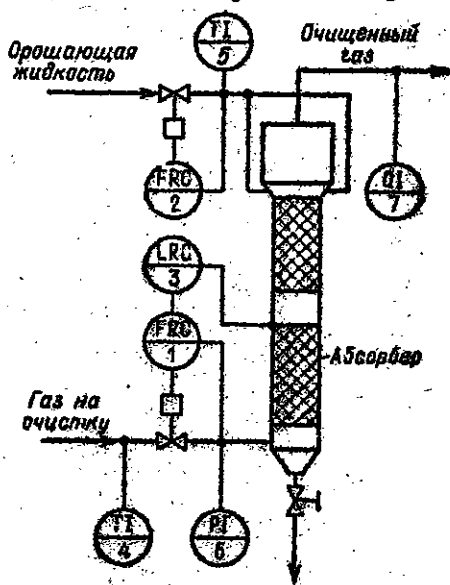


Рис. 103. Схема автоматизации очистки газовых выбросов в насадочном абсорбере.

является либо зеркало жидкости, либо поверхность пленки текущей жидкости, образующейся на различном рода насадках.

2) Барботажные абсорберы. Поверхность раздела фаз образуется во время движения газа через жидкость.

3) Капельные абсорберы. Поверхность раздела фаз образуется распылением жидкости в движущемся газе на мелкие капли.

В качестве примера рассмотрим схему автоматизации очистки газовых выбросов в насадочном абсорбере (рис.103).

Насадочные абсорберы представляют собой колонны. Жидкость в основном в виде пленки стекает под действием силы тяжести и соприкасается с газом, движущимся снизу вверх,

При одновременном движении газа и жидкости противотоком наблюдаются четыре режима в зависимости от скоростей газа и жидкости. Первый режим — пленочный — наблюдается при сравнительно небольших скоростях газа и жидкости. Гидравлическое сопротивление зависит только от скорости газа пропорционально квадрату скорости и не зависит от плотности орошения. Второй режим — режим подвисания. При этом толщина пленки и количество удерживаемой жидкости увеличивается. Гидравлическое сопротивление зависит от скорости газа (пропорционально четвертой и пятой степени скорости) и расхода жидкости на орошение. Третий режим — захлебывание и барботажи. В этом случае жидкость накапливается в насадке, а газ начинает барботировать через жидкость. Гидравлическое сопротивление резко возрастает. Режим захлебывания соответствует максимальной эффективности насадочного абсорбера, так как поверхность соприкосновения фаз определяется не поверхностью насадки, а условиями барботажа. Режим барботажа неустойчив: при небольших колебаниях расхода газа он переходит во второй или четвертый режимы, характеризующиеся меньшей интенсивностью массообмена. Четвертый режим — унос — наступает при увеличении скорости газа выше скорости, соответствующей режиму захлебывания. При этом жидкость выносятся из аппарата в виде брызг вместе с газом, орошение насадки ухудшается.

Следовательно, основными регулируемыми параметрами в насадочных абсорберах являются скорости газа и орошающей жидкости. Эти параметры регулируются с помощью АСР расхода (1, 2). Расход газа на очистку регулируется по каскадной схеме:



задание регулятору расхода выдает регулятор уровня (3). Такая схема позволяет стабилизировать работу адсорбера в заданном режиме, например в режиме барботажа. В принципе возможно регулирование уровня по выходу орошающей жидкости из адсорбера.

Контролируются также температура газа (4) и жидкости (5), давление газа, поступающего на очистку (6), и степень очистки газа (7).

Адсорберы периодического действия работают по циклу: адсорбция — десорбция (регенерация). Их автоматизация сводится к регулированию расхода газа и контролю основных параметров процесса (температура, давление, степень очистки газа).

Адсорбер непрерывного действия представляет собой колонну, в которой сверху вниз под действием силы тяжести движется адсорбент. Он проходит зоны охлаждения водой, поглощения, нагрева паром и десорбции.

Основными регулируемыми параметрами являются температура и расход газа. Нагрузка на адсорбер устанавливается с помощью АСР расхода газа. Температура по зонам адсорбера регулируется изменением расхода пара и газа. Во избежание прорыва газа через нижнюю зону адсорбера регулируется уровень адсорбента в гидрозатворе. Контролируется расход воды, газа и пара, а также степень очистки газа и перепад давления на адсорбере.

## Глава 4

### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

#### 4.1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

**К л а с с и ф и к а ц и я А С У .** ОАСУ – отраслевая автоматизированная система управления – осуществляет учет хозяйственной деятельности предприятий отрасли и планирование их основных показателей на соответствующий период времени.

АСУП – автоматизированная система управления предприятием – предназначена для решения основных задач управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятия в целом и его самостоятельных частей на основе применения экономико-математических методов расчета и средств вычислительной техники. АСУП осуществляет управление основными фондами, трудовыми ресурсами и материально-техническим снабжением.

АСОДУ – автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления. Она осуществляет контроль протекания производственного процесса, оперативный учет технико-экономических показателей, оперативно-календарное планирование выработки продукции на смену, сутки, оперативное управление.

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом – предназначена для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления.

**П р и н ц и п ы р а з р а б о т к и А С У .** При создании и внедрении АСУ следует руководствоваться принципами, разработанными академиком В.М.Глушковым:

– принцип новых задач состоит в том, что нельзя перекладывать на плечи ЭВМ традиционно сложившиеся методы и приемы управления, а необходимо перестраивать эти методы в соответствии с новыми возможностями, которые дает ЭВМ;

- принцип комплексного (системного) подхода к проектированию АСУ предполагает, что АСУ должна основываться на системном анализе как объекта, так и системы управления им, должны быть определены цели и критерии, проведена структуризация, вскрывающая весь комплекс вопросов технического, экономического и организационного порядка;

- принцип первого руководителя состоит в том, что реализация двух первых принципов обуславливает необходимость непосредственного участия руководителя соответствующего объекта в заказе на АСУ, его разработке и внедрении;

- принцип максимальной разумной типизации проектных решений заключается в стремлении исполнителя предложить свои решения возможно более широкому кругу заказчиков;

- принцип преемственности системы предполагает разработку АСУ на базе сложившейся системы управления с изменениями, продиктованными целями создания АСУ;

- принцип функциональной избыточности состоит в том, что на одну и ту же задачу имеются несколько типовых рабочих программ, что позволяет снизить трудоемкость в десятки раз за счет наличия достаточного запаса типовых решений;

- принцип непрерывного развития системы реализуется по мере внедрения различных операций АСУ, т.е. расширяет круг задач, которые могут быть решены в новых условиях;

- принцип единства информационной базы состоит в том, что всю информацию от объекта следует вводить один раз и использовать ее для решения всех задач управления; реализацией этого принципа явилось создание банка данных - набора массивов, содержащих управленческую информацию, сгруппированную по функциональному признаку;

- принцип автоматизации обработки документов заключается в том, что при разработке системы документообработки производится большая работа по упорядочиванию форм документов, изъятию ненужных показателей и изменению потоков движения информации; при этом программа расчета составляется так, чтобы один и тот же показатель рассчитывался только один раз и использовался во всех документах по мере необходимости.

## 4.2. ФУНКЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

4.2.1. Назначение и функции АСУП. Проблема автоматизированного управления современным промышленным предприятием относится к числу весьма сложных и трудоемких. Доминирующее значение в АСУП имеют экономические задачи управления: нормальное функционирование предприятия возможно лишь при наличии непрерывных связей между производством и снабжением, производством и финансовыми средствами, производством и реализацией готовой продукции.

Определяющими в управлении предприятием являются не технологические ограничения, а директивные указания в виде плана, имеющие силу закона и обязательные к исполнению.

Существенна постоянная взаимосвязь со множеством других предприятий (организаций) и наличие вследствие этого таких специфических задач, как управление снабжением, сбытом, финансовой деятельностью, составление статистической отчетности, учет стоимостных показателей, проблемы бухгалтерского учета, экономико-статистические расчеты.

Важную роль играют разнообразные задачи управления людьми и трудовыми ресурсами (подготовка приказов и распоряжений, контроль за приемом и увольнением, расчет заработной платы и т.д.).

4.2.2. Назначение и функции АСОДУ. В круг задач, решаемых АСОДУ, входят следующие (рис. 104):

- учет и контроль выработки готовой продукции;
- учет и контроль наличия сырья, энергии, химикатов и т.д.;
- учет работы оборудования;
- оценка возможности выполнения плана в плановый период;
- оперативное управление производством с целью согласования нагрузок отдельных участков;
- принятие решений при различных ситуациях на производстве (в том числе и аварийных).

Каждое из производств работает в соответствии с разработанным календарным планом-графиком выпуска продукции. Отклонения от заданного плана могут происходить в результате аварийного останова оборудования, нехватки сырья, перебора в

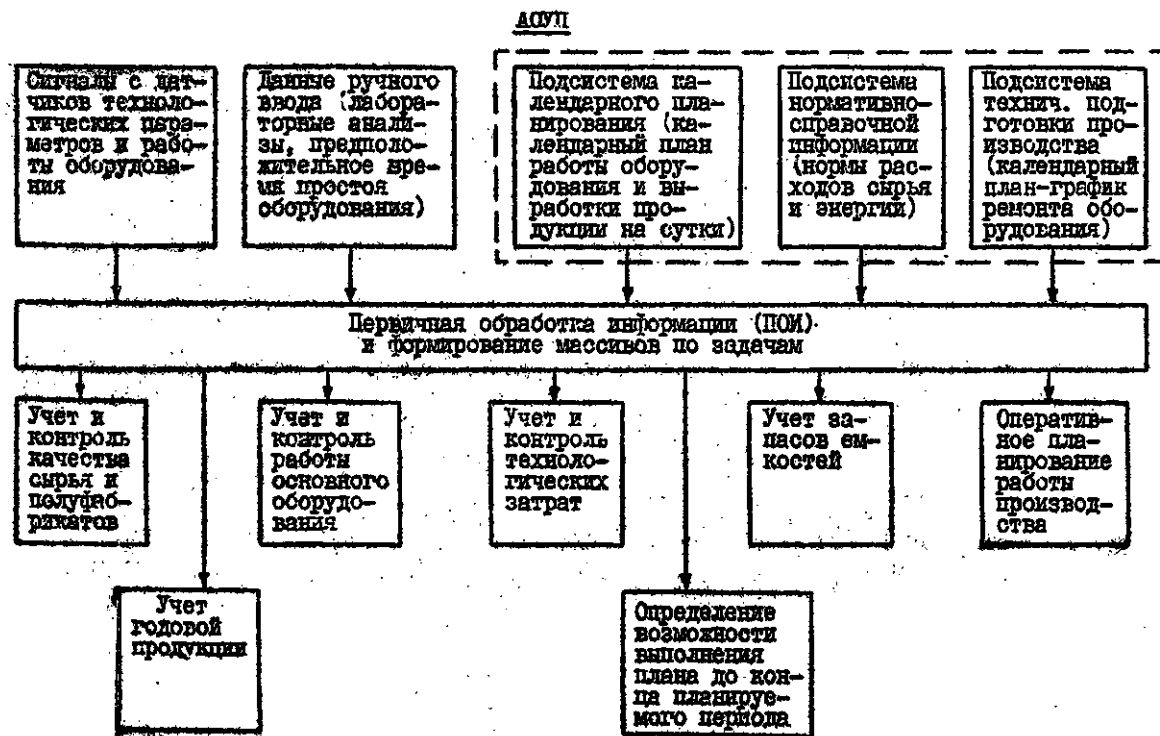


Рис.104. Функциональная структурная схема АСОУП.

снабжении электроэнергией, паром, химикатами и т.д. В этих случаях АСОДУ решает задачи оперативного планирования работы производства. Они сводятся к координации производительности отдельных агрегатов и распределению материальных потоков между ними. Оперативный план разрабатывается на период вынужденного изменения производительности оборудования. Задача оперативного планирования заключается в том, чтобы на каждом этапе планирования найти такие варианты работы оборудования и способы распределения сырья, которые обеспечивали бы экстремум некоторого критерия оптимальности работы производства при существующих ограничениях на производительность оборудования, запасы продукции и сырья в промежуточных емкостях, расходы сырья, энергии и химикатов. Экстремумом некоторого критерия оптимальности работы производства может быть максимум выпуска продукции, максимум прибыли, минимум себестоимости и т.д.

Первичная обработка информации включает в себя опрос датчиков, масштабирование, фильтрацию и проверку достоверности сигналов. Дискретность опроса датчиков определяется исходя из допустимой ошибки экстраполяции. В процессе масштабирования производится расчет значений параметров по формуле масштабирования датчиков с линейной шкалой. При проверке достоверности сигнала скорость его изменения сравнивается с допустимым значением. В случае отсутствия значения параметра проверяется значение другого, связанного с первым, параметра.

**4.2.3. Назначение и функции АСУТП.** Автоматизированная система управления технологическим процессом — это человеко-машинная система управления, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления технологическим объектом в соответствии с принятым критерием.

**Технологический объект управления (ТОУ)** — это совокупность технологического оборудования и реализованного в нем по соответствующим инструкциям или регламентам технологического процесса.

Такое определение АСУТП подчеркивает наличие в ее составе современных автоматических средств сбора и обработки информации, в первую очередь вычислительной техники; роль чело-

...а в системе как субъекта труда, принимающего содержательное участие в выработке решений по управлению; реализацию в системе обработки технологической и технико-экономической информации; цель функционирования АСУТП, заключающуюся в оптимизации работы технологического объекта управления по принятому критерию (критериям) управления путем соответствующего выбора управляющих воздействий.

Критерий управления АСУТП — это соотношение, характеризующее качество функционирования технологического объекта управления в целом и принимающее конкретные числовые значения в зависимости от используемых управляющих воздействий. Критерием управления обычно является технико-экономический показатель (например, себестоимость выходного продукта при заданном его качестве, производительность ТОВ при заданном качестве выходного продукта и т.п.) или технический показатель (например, параметры процесса, характеристики выходного продукта).

Система управления ТОВ является АСУТП в том случае, если она осуществляет управление в целом в темпе протекания технологического процесса, а также если в выработке и реализации решений по управлению участвуют средства вычислительной техники и другие технические средства и человек — оператор.

Функции АСУТП подразделяются на управляющие, информационные и вспомогательные.

Управляющая функция АСУТП — это выработка и реализация управляющих воздействий на технологический объект управления.

К управляющим функциям АСУТП относятся:

- регулирование (стабилизация) отдельных технологических переменных;
- однократное логическое управление операциями или аппаратами;
- программное логическое управление группой оборудования;
- оптимальное управление установившимися или переходными технологическими режимами или отдельными стадиями (участками) процесса;
- адаптивное управление объектом в целом (например, самонастраивающийся комплексно-автоматизированный участок станков с программным управлением).

Информационная функция АСУТП включает сбор, обработку и представление информации о состоянии ТОВ оперативному персоналу или передача этой информации для последующей обработки.

К информационным функциям АСУТП относятся:

- централизованный контроль и измерение технологических параметров;
- косвенное измерение (вычисление) параметров процесса, технико-экономических показателей процесса;
- формирование и выдача данных оперативному персоналу АСУТП или автоматизированного технологического комплекса (АТК);
- подготовка и передача информации в смежные системы управления;
- обобщенная оценка и прогноз состояния АТК и его оборудования.

Отличительная особенность управляющих и информационных функций АСУТП — их направленность на конкретного потребителя (объект управления, оперативный персонал, смежные системы управления).

Вспомогательные функции АСУТП — это функции, обеспечивающие решение внутрисистемных задач. Вспомогательные функции не имеют потребителя вне системы и обеспечивают функционирование АСУТП (технические средства системы, контроль за их состоянием, хранение информации и т.п.).

Функциональная структура АСУТП — это такая структура, элементами которой являются рассмотренные выше функции системы и их части (операции, процедуры), а связи между элементами отражают информационно-логическую последовательность и подчиненность их реализации.

Для выполнения функций АСУТП необходимо взаимодействие следующих ее составных частей:

- технического обеспечения;
- программного обеспечения;
- информационного обеспечения;
- организационного обеспечения;
- оперативного персонала.

Техническое обеспечение АСУТП представляет собой полную совокупность технических средств, до-



статочную для функционирования, АСУТП и реализации системой всех ее функций.

Программное обеспечение АСУТП — это совокупность программ, необходимых для реализации функций АСУТП, заданного функционирования комплекса технических средств АСУТП и предполагаемого развития системы.

Информационное обеспечение АСУТП включает:

- информацию, характеризующую состояние автоматизированного технологического комплекса;
- системы классификации и кодирования технологической и технико-экономической информации;
- массивы данных и документов, необходимых для выполнения всех функций АСУТП, в том числе нормативно-справочная информация.

Организационное обеспечение АСУТП представляет собой совокупность описаний функциональной, технической и организационной структур, инструкций и регламентов для оперативного персонала автоматизированной системы управления технологическим процессом, обеспечивающую заданное функционирование оперативного персонала в составе АТК.

В состав оперативного персонала АСУТП входят:

- технологи-операторы, осуществляющие контроль за работой и управление ТСУ с использованием информации и рекомендаций по рациональному управлению, выработанных комплексом технических средств АСУТП;
- эксплуатационный персонал АСУТП, обеспечивающий правильность функционирования комплекса технических средств АСУТП.

Ремонтный персонал в состав оперативного персонала АСУТП не входит.

Организационная структура АСУТП — это такая структура, элементами которой являются отдельные должностные лица — производственные или административные работники, осуществляющие в той или иной мере управление данным технологическим объектом, или их группы, сформированные по какому-либо содержательному признаку. Основные связи между элементами организационной структуры соответствуют отношениям оперативной соподчиненности указанных работников.

#### 4.3. РЕЖИМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА В АСУТИ

В зависимости от степени участия людей в выполнении функций системы различают два режима реализации функций: автоматизированный и автоматический. На человека, называемого в АСУТИ оператором, возлагаются функции, которые либо пока вообще нельзя поручать автоматам (нет формализованного описания функций, нет аппаратуры, способной ее выполнить), либо автоматическое выполнение которых пока не оправдано экономически. Кроме того, оператор всегда выполняет функцию резерва на случай отказа автоматов.



Рис.105. Информационный режим использования ВК.

Автоматизированный режим реализации управляющих функций характеризуется участием человека в выработке (принятии) решений и (или) их реализации. При этом возможны следующие варианты.

1. Информационный (ручной) режим, при котором вычислительный комплекс предоставляет оперативному персоналу контрольно-измерительную информацию о состоянии ТОО, а выбор и осуществление управляющих воздействий производит оператор, непосредственно управляя исполнительными механизмами (рис.105).

Здесь ВК выполняет функции централизованного контроля, вычислительная комплексных технологических и технико-экономических

показателей, а также контроль работы и состояния оборудования.

Данные о ТОУ, полученные с помощью ВК, кроме вывода на централизованные средства отображения информации, могут передаваться в АСУ верхнего уровня для дальнейшей обработки.

2. Режим "советчика оператора", при котором ВК вырабатывает рекомендации по управлению, а решение об их использовании принимается и реализуется оперативным персоналом (рис. 106, а).

Здесь ВК кроме задач, указанных в первом варианте использования, решает задачи анализа информации и поиска оптимальных решений по управлению ТОУ.

Процессом в ТОУ управляет оператор, изменяя уставки регуляторов или непосредственно воздействуя на исполнительные механизмы.

3. Диалоговый режим, при котором оперативный персонал имеет возможность корректировать постановку и условия задачи, решаемой ВК, при выработке рекомендаций по управлению объектом.

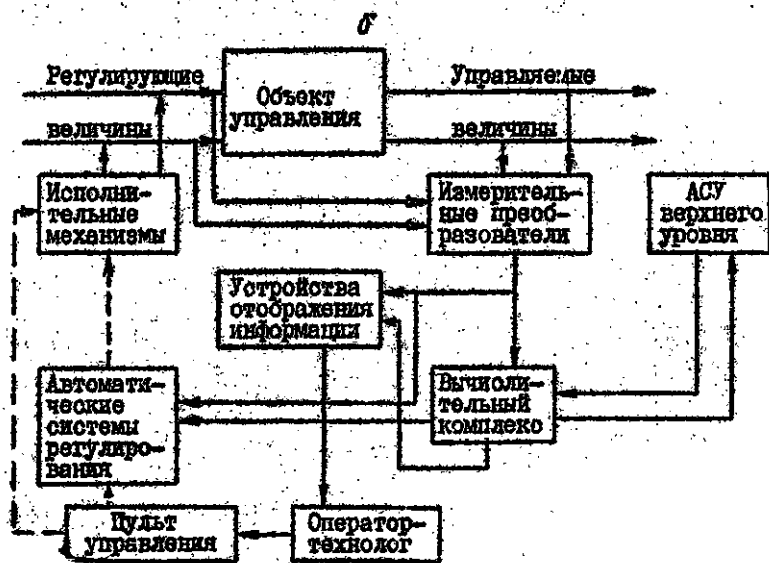
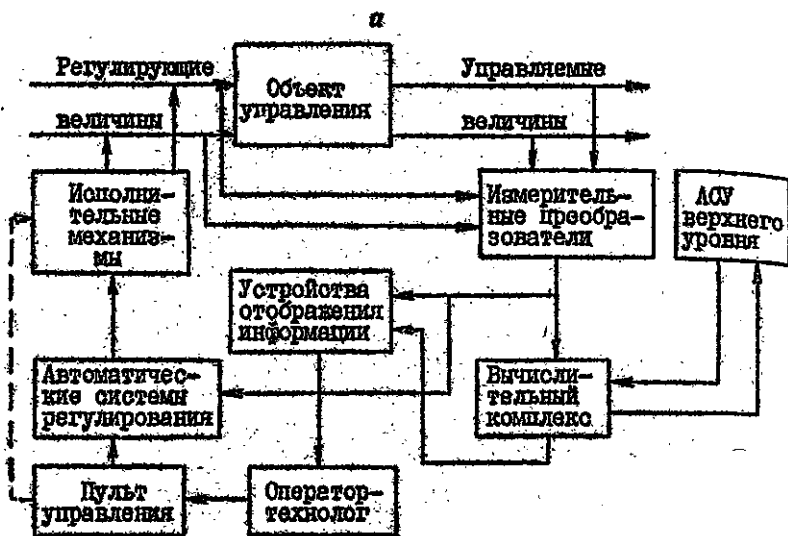
Автоматический режим реализации управляющих функций предусматривает автоматическую выработку и реализацию управляющих воздействий. При этом существуют следующие варианты.

1. Режим супервизорного (корректирующего) управления, когда ВК изменяет уставки и (или) параметры настройки локальных автоматических систем регулирования (рис. 106, б).

Основная задача такого управления — автоматическое поддержание технологического процесса в ТОУ вблизи оптимальной рабочей точки путем оперативного воздействия на него. Функции оператора-технолога здесь сводятся к общему наблюдению за ходом процесса. Вмешательство оператора необходимо при осуществлении наиболее ответственных, сложных и тонких операций по управлению технологическим объектом и при возникновении непредвиденных (аварийных) ситуаций или при изменениях свойств и видов сырья, а также вида вырабатываемой продукции.

2. Режим непосредственного цифрового или прямого цифрового управления (НИУ), когда ВК формирует воздействия, поступающие прямо на исполнительные механизмы (рис. 106, в).

Регуляторы можно рассматривать как малые цифровые или аналоговые вычислительные устройства. Изменяя параметры на-



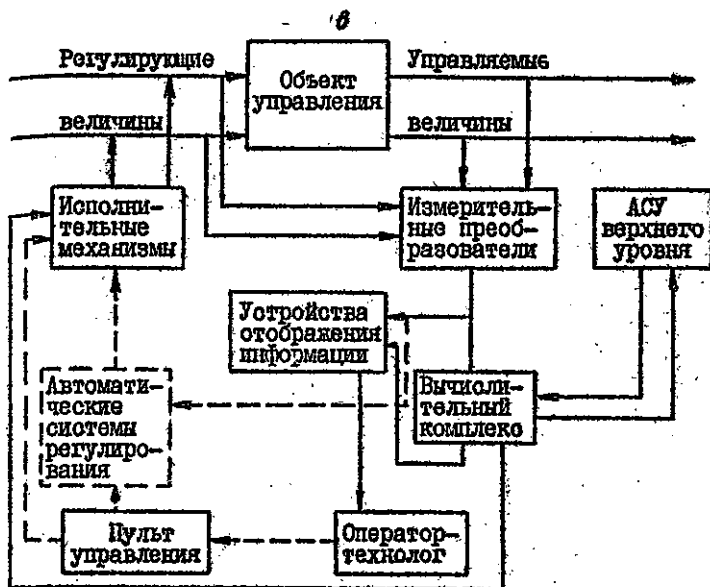


Рис. 106. Использование ВК в режиме советчика-оператора (а), супервизорного управления (б) и НПУ (в).

стройки, а иногда и структуру, многие регуляторы можно использовать для решения различных задач управления. Концепция НПУ позволяет заменить совокупность регуляторов с задаваемыми им уставками на ВК.

Здесь автоматические системы регулирования присутствуют как резервные. Уставки для регуляторов вводятся в ВК оператором или внешним ВК, выполняющим расчеты по оптимизации процесса. Оператор имеет возможность обращаться к управляющей программе ВК.

В этом режиме управления можно легко реализовать программным путем системы каскадного и многосвязного регулирования. Одно из главных преимуществ применения АСУП с ВК в режиме НПУ заключается в возможности изменения алгоритмов управления для контуров простым внесением изменений в хранимую программу. Однако такие изменения должны быть тщательно подготовлены, так как новая программа должна быть проверена перед использованием ее для реального управления.

НЦУ позволяет реализовать не только оптимизирующие функции, но и операции переключения исполнительных механизмов и вспомогательного оборудования, необходимые в режимах пуска-останова.

Однако в случае отказа ВК в системе с НЦУ может возникнуть полная потеря управляемости ТОВ.

#### 4.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АСУТП

Математическое обеспечение АСУТП – это совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, используемых при разработке и функционировании АСУТП. Математическая формулировка любой задачи оптимального управления включает в себя математическую модель объекта и критерий управления.

Математическая модель – это система математических соотношений, описывающих поведение ТОВ, а также те условия, в которых он функционирует.

Критерий управления ТОВ – это цель управления (минимальная себестоимость продукта, максимальная производительность ТОВ и др.), достижение которой и обеспечивает АСУТП.

Переработка информации в ВК осуществляется по алгоритмам.

Алгоритм управления – это последовательность математических и логических операций, которые нужно выполнить над поступающей информацией в ВК для формирования управляющих воздействий, обеспечивающих достижение цели управления.

Каждый алгоритм соответствует тем рассуждениям и вычислениям, которые должен произвести оператор при отсутствии ВК. Алгоритм выражается на формальном языке математических формул и логических условий.

Алгоритмы управления изображаются чаще с помощью блок-схем в соответствии с ГОСТ 19003-80.

Программное обеспечение охватывает круг задач, связанных с разработкой и эксплуатацией программ ВК.

Программа – это алгоритм, записанный на языке программирования.

Управление программами обеспечивает операционная система (ОС). Взаимодействия программ между собой осуществляются через ОС.

Программное обеспечение АСУТП подразделяется на общее программное обеспечение и специальное программное обеспечение.

Общее программное обеспечение АСУТП поставляется в комплекте со средствами вычислительной техники. К нему относятся необходимые в процессе функционирования и развития системы программы, программы для автоматизации разработки программ, компоновки программного обеспечения, организации функционирования и другие служебные и стандартные программы.

Так, к общему программному обеспечению относятся: программа-диспетчер, координирующая работу программ и устройств ВК; программа управления различными узлами ВК; программа для формирования таблиц, печати результатов расчета; стандартные подпрограммы для вычисления часто встречающихся функций; трансляторы с алгоритмических языков (языков программирования) ФОРТРАН, АЛГОЛ, ПЛ-1, БЕЙСИК, ПАСКАЛЬ, АССЕМБЛЕР и др., тесты для проверки исправности устройств ВК.

Специальное программное обеспечение (СПО) АСУТП разрабатывается или заимствуется из соответствующих фондов при создании конкретной системы и включает программы реализации основных (управляющих и информационных) и вспомогательных (обеспечение заданного функционирования комплекса технических средств (КТС) системы, проверка правильности ввода информации, контроль за работой КТС системы и т.п.) функций АСУТП.

Специальное программное обеспечение АСУТП разрабатывается на базе и с использованием программ общего программного обеспечения. Программы специального обеспечения, имеющие перспективу многократного использования, после промышленной проверки могут передаваться в соответствующие фонды или заводам-изготовителям вычислительной техники для включения их в состав общего программного обеспечения.

СПО содержит следующие функциональные программы: обнаружение выхода параметров ТОВ за допустимые пределы; отглаживание (фильтрация) сигналов датчиков; вычисление технико-экономических показателей работы ТОВ; определение опасных ситуаций на ТОВ; вычисление управляющих воздействий, реализующих соответствующий закон управления; оптимизацию технологического процесса; оперативную коррекцию плана производства; прогнозирующий расчет протекания технологического процесса.

#### 4.5. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АСУТП

4.5.1. Состав технического обеспечения АСУТП. Под техническим обеспечением АСУТП, как указывалось выше, подразумевается комплекс технических средств (КТС), предназначенных для функционирования АСУТП.

В состав комплекса технических средств входят вычислительные и управляющие устройства; средства получения (датчики), преобразования, хранения, отображения и регистрации информации (сигналов); устройства передачи сигналов и исполнительные устройства.

Непосредственно на ТОУ устанавливаются датчики (измерительные преобразователи), сигнальные двухпозиционные устройства, исполнительные регулирующие органы. Около ТОУ устанавливаются местные щиты управления для устройств локальной автоматизации.

Центральный пульт управления имеет пульт оператора, щит, печатающую машинку для регистрации параметров по вызову оператора, кроссовый шкаф. На пульте установлены аналоговые измерительные приборы, индикаторы для представления оператору символьной и графической информации (дисплей), сигнальные табло, сообщаемые оператору рекомендации по ведению технологического процесса, дистанционные задатчики, клавиатура для ввода показаний, средства цеховой связи, ключи дистанционного управления. Здесь же располагается ВК, в состав которого входят устройства информационной подсистемы (коммутаторы сигналов, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), устройство выработки отклонений параметров, устройство памяти предельных значений параметров, устройство масштабирования); устройства управляющей системы (арифметическое устройство, оперативное запоминающее устройство на магнитных дисках или лентах, устройство мультиплексной (селекторной) связи с другими устройствами ВК, цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), устройства управления исполнительными механизмами, устройства управления регуляторами и регулирующими органами); рабочее место оператора ВК, представляющее собой совокупность информационных и командных органов (устройства контроля, ключи, кнопки),



расположенных на щитах, отдельных панелях, пультах, приставках к пульту, мнемонических фрагментов (мнемоошем) со встроенными индикаторами; электрическая печатающая машинка; считыватель с перфоленты, ленточный перфоратор.

Совокупность всех укрупненных узлов КТС представляется в виде технической структуры АСУТП (рис.107).

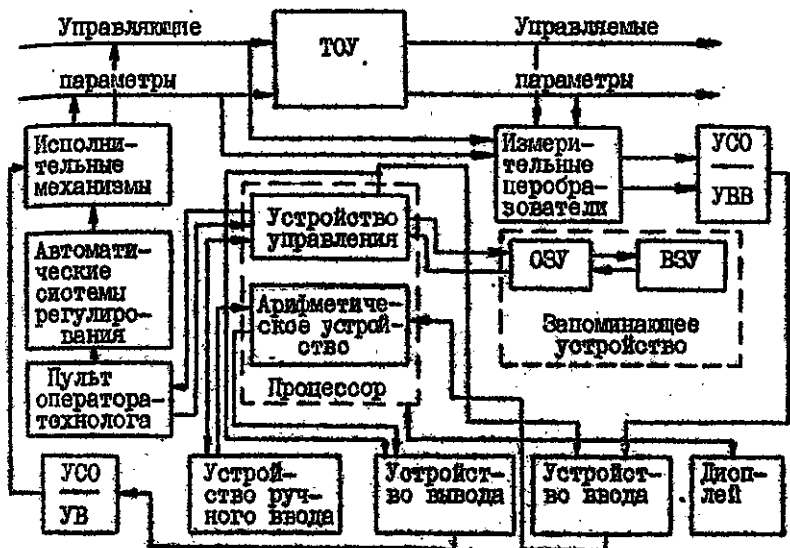


Рис.107. Техническая структура АСУТП.

Коммутаторы сигналов и АЦП образуют УСО/УВ (устройство связи с объектом/устройство ввода); ЦАП, устройства управления исполнительными механизмами, регуляторами и регулируемыми органами образуют УСО/УВ (устройство связи с объектом/устройство вывода).

**4.5.2. Управляющие вычислительные комплексы на базе мини-ЭВМ.** Агрегатная система средств вычислительной техники. Одним из этапов развития УВМ является создание агрегатной системы средств вычислительной техники (АСВТ) первой очереди, построенной на дискретных полупроводниковых элементах (АСВТ-Д), а второй очереди (АСВТ-И), построенной на интегральных схемах.

АСВТ представляет собой набор агрегатных устройств с унифицированными внешними связями, из которых можно компоновать различные модели вычислительных машин с заданными техническими свойствами.

Технические и программные средства второй очереди разработки, т.е. системы АСВТ-М, нашли широкое применение в АСУ и АСУТП при решении разнообразных задач управления в реальном масштабе времени. Верхнее звено АСВТ-М - вычислительная машина М-4030 - высокопроизводительная ЭВМ универсального применения. Далее следуют такие мини-ЭВМ, как М-6000, М-6010, М-7000.

На базе АСВТ-М был разработан ряд управляющих вычислительных комплексов (УВК) различного назначения и производительности, имеющих широкую номенклатуру периферийных устройств и развитую систему программирования. Начиная с выпуска серии АСВТ, принято различать три разновидности УВК по составу оборудования: базовые, типовые и специфицированные.

Базовый комплекс - стандартный минимальный УВК, включающий оборудование для поставки, используется при компоновке типовых и специфицированных комплексов.

Типовой комплекс - серийно выпускаемый УВК общего назначения, предназначенный для самостоятельного применения при решении типовых задач управления; с его помощью и на базе соответствующего программного обеспечения осуществляется проблемная ориентация УВК.

Специфицированные комплексы рассчитаны на конкретное применение и комплектуются по спецификации заказчика.

УВК АСВТ-М М-6000 были в недавнем прошлом самыми распространенными средствами, используемыми в АСУТП. Подавляющее большинство реализованных к настоящему времени АСУТП базируются на них.

УВК М-6000 предназначены для компоновки автономных вычислительных систем, низовых подсистем сбора и первичной обработки информации управления технологическими процессами с применением сравнительно простых алгоритмов обработки информации. Они комплектуются в виде типовых и специфицированных комплексов.

Центральным устройством комплекса является процессор, осуществляющий обмен информацией с оперативным запоминающим устройством.

тройством (ОЗУ), периферийными устройствами, к которым относятся и УСО, а также арифметическую и логическую обработку информации. Для ускорения операций умножения и деления в комплексе имеется специальное устройство - арифметический расширитель.

ОЗУ выполнено в виде набора модулей емкостью 8 Кбайт каждый. Непосредственно к процессору могут подключаться два модуля ОЗУ, в случае применения устройства наращивания памяти (УНП) число модулей можно довести до восьми. Для ускорения операций записи и выдачи информации из ОЗУ без загрузки процессора в составе модулей М-6000 предусмотрен канал прямого доступа к памяти (КПДП). К нему подключают внешние накопители (например, на магнитных дисках и лентах) и быстродействующие устройства ввода-вывода (ВВУ). Медленно действующие ВВУ и УСО могут быть присоединены к процессору, расширителю ввода-вывода (РВВ) или расширителю связи с объектом (РСО). Подключение устройств осуществляется через унифицированный интерфейс (устройство для взаимной стыковки различных технических средств).

Для связи с оператором в комплексе М-6000 впервые были широко использованы электронно-лучевые дисплеи: станция индикации данных (СИД-1000), станция индикации графических данных, а затем дисплейный модуль ДМ-2000. Кроме дисплеев предусмотрены: устройство печати технологической информации на базе печатающей машинки АПМ-3М, устройство печати с клавиатурой на базе печатающей машинки "Консул", устройство печати знакосинтезирующее на базе устройств Dato или DGM - 180.

В последних моделях М-6000 долговременное хранение информации и организация баз данных осуществляется с помощью накопителей на магнитных дисках.

При использовании в системах управления комплекс М-6000 обладает большим преимуществом - наличием широкой номенклатуры агрегатных модулей связи с объектом. В состав модулей входят нормализаторы, фильтры, коммутаторы сигналов низкого и среднего уровня, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, модули ввода и вывода дискретных и число-импульсных сигналов. Состав и число модулей выбирают в соот-

ветствии с требованиями конкретной системы управления.

Вычислительные машины семей-  
ства малых ЭВМ (СМ ЭВМ). В результате дальней-  
шего совершенствования УВМ, программно совместимых с АСВТ,  
была разработана серия малых ЭВМ (СМ ЭВМ): первая очередь -  
СМ-1, СМ-2; вторая очередь - СМ-1М (СМ 50/60), СМ-2М.

Помимо управляющих ЭВМ в составе средств второй очереди  
разработаны специализированные устройства: субкомплекс связи  
с объектом ССО-1, ССО-2; терминалы связи с объектом ТСО-4,  
ТСО-5; рабочее место оператора УВК РМО-01; рабочее место опе-  
ратора-технолога РМОТ-01, РМОТ-02.

Используемые совместно с концентратором баз данных, вы-  
полняемым на УВМ СМ-1М, СМ-2М, эти устройства позволяют соз-  
давать многомашинные комплексы различного назначения.

Помимо перечисленных УВМ в системах управления наиболее  
часто применяются УВМ ЕС 1010 и М-400.

УВК СМ-2 может быть использован:

- в сложных автоматизированных системах управления тех-  
нологическими процессами и в системах автоматизации научного  
эксперимента, требующих высоких производительности и живуче-  
сти;
- на верхнем уровне иерархических систем управления слож-  
ными агрегатами, цехами, производствами;
- для построения центров обработки данных в системах  
массового обслуживания;
- в автоматизированных системах обработки результатов ис-  
пытаний сложного оборудования.

Основу комплексов СМ-2 составляет процессор СМ-2П, кото-  
рый является старшим (по отношению к процессору СМ-1П) про-  
цессором одной из двух принятых в СМ ЭВМ архитектурных линий  
развития отечественной вычислительной техники. Процессор СМ-  
2П отличается от процессора СМ-1П более высокой производи-  
тельностью, расширенной системой команд (включая и операции с  
плавающей запятой), возможностью компоновки вычислительного  
комплекса (ВК) на базе двух процессоров с двумя каналами пря-  
мого доступа в память, работающих с общей оперативной памятью

до 128К слов и общими или отдельными периферийными устройствами.

Кроме процессора в состав УВК СМ-2 входят: устройство оперативной памяти (УОП), канал прямого доступа в память (КПДП) и коммутаторы четырех- и восьмиканальные (КМР-4, КМР-8). Коммутаторы предназначены для обеспечения внутрисистемных связей между устройствами ВК. С помощью коммутаторов реализуется полная матричная коммутация каждого процессора и канала с каждым УОП и согласователем ввода-вывода (СВВ); к СВВ подключаются периферийные устройства. При одноуровневой адресации максимальное число подключаемых периферийных устройств равно 56, при двух ступенях адресации (с использованием мультиплексорного расширителя интерфейсов) — 1764.

В состав программного обеспечения СМ-2 входят операционные средства агрегатной системы программного обеспечения (АСПО): библиотеки, проблемно-ориентированные пакеты программных модулей; система подготовки программ; сервисные и контрольно-диагностические программы.

УВК СМ-2М — это модернизированный комплекс СМ-2. Цель модернизации — улучшение технических и эксплуатационных характеристик комплекса, а также перевод модулей и шкафов СМ-2 на конструктивы второй очереди СМ ЭВМ.

Габариты УВК СМ-2М уменьшены по сравнению с СМ-2. Оперативная и постоянная (микропрограммная) память выполнены на интегральных микросхемах, что значительно повышает надежность.

УВК СМ-2М обладает полной программной совместимостью с системами М-7000 и СМ-2, односторонней совместимостью на уровне перемещаемых программ с системой М-6000, а также совместимостью с этими системами по интерфейсу ЗК. Замена СМ-2 на СМ-2М на любом объекте не требует доработок.

МикроЭВМ СМ-50/60 является младшей моделью в ряду программно совместимых ЭВМ архитектурной линии СМ-1/СМ-2 СМ ЭВМ. Конструктивно она выполнена в виде автономного комплексного блока (АКБ), который можно устанавливать на столе или размещать в шкафах и тумбах.

На базе микроЭВМ СМ-50/60 создан ряд ВК, предназначенных для использования в многомашинных вычислительных комплексах (подсистемы управления вводом-выводом), для встраивания в

сложные приборы и устройства в системах научного эксперимента и системах управления технологическими процессами; для построения разветвленной системы связи между ВК и функциональными субкомплексами; для построения терминальных субкомплексов связи с объектом и информационно-измерительных комплексов.

К СМ-50/60 могут быть подключены накопители на магнитных лентах и дисках для хранения больших информационных массивов в системах обработки данных, а также субкомплекс внешней памяти на кассетной магнитной ленте для хранения информационных массивов, подготовки данных и загрузки программ.

Оперативный обмен информацией человека с вычислительной машиной в СМ-50/60 обеспечивают дисплейный модуль ВТА-2000 и знакосинтезирующее устройство последовательной печати (УПЗ).

Примером функционального комплекса, созданного на базе процессора СМ-50/60, может служить терминал вычислительной связи с объектом ТВСО-1.

Программное обеспечение СМ-50/60 состоит из дисковой операционной системы (ДЮС АСПО), пакета программных модулей для компоновки операционных систем многомашиных комплексов (ППМ-ОСМК) и набора автономных тестов. Компоновку программного обеспечения систем централизованного контроля и информационных подсистем АСУТП обеспечивает дисковый пакет программных модулей генерации задач сбора и обработки информации (ДПМ СИИ). Подготовка и выполнение (в реальном масштабе времени) задач сбора и обработки данных, расчета и выдачи управляющих воздействий могут быть также осуществлены при помощи интерпретирующей системы БЕЙСИК-РВ.

Используя СМ-50/60, можно создать системы управления небольшой информационной емкости, имеющие максимальные числовые характеристики: входных аналоговых сигналов среднего уровня - 120; входных дискретных сигналов - 64; выходных аналоговых токовых сигналов - 2; выходных аналоговых сигналов напряжения - 16; двухпозиционных выходов - 32. Для систем большей емкости к УВК подключают субкомплексы связи с объектом (ССО-1, ССО-2).

ССО-1 - это подсистема программируемого ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов по командам ВК, поставляемая с уже скомпонованной микропрограммной системой.

ССО-2 - это подсистема сбора и первичной обработки аналоговых и дискретных сигналов, выполняемых циклически по программам, и передачи результатов в ВК. Объем первичной обработки определяется при генерации и соответствует возможности пакета программных модулей генерации задач сбора и обработки информации (ДПМ СОИ).

Число и типы датчиков и выходных устройств, подключаемых к ССО-1 и ССО-2, определяется набором модулей, входящих в состав комплекса. Максимальное число: входных сигналов - до 520 аналоговых, до 320 дискретных; выходных сигналов - до 10 аналоговых и до 320 дискретных.

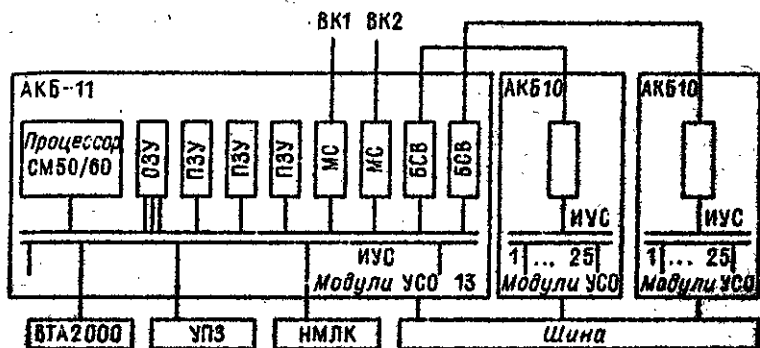


Рис.108. Структурная схема ТВСО-1.

Терминал вычислительный связи с объектом ТВСО-1 предназначен для ввода-вывода и обработки аналоговой и дискретной информации, а также для связи с оператором-технологом. ТВСО-1 построен на базе микроЭВМ CM-50/60 и представляет собой проектнокомпонутый комплекс с переменным составом УС0 и периферийного оборудования (рис.108). На рис.108 обозначено: ИУС - интерфейсное устройство; АКБ - блок автономный комплектный; УПЗ - устройство печати знаковснтезирующее; НМЛК - накопитель на магнитной ленте кассетный; МС - модуль сопряжения; БСВ - блок стабилизации и выпрямления; ВК - вычислительный комплекс; ВТА 2000 - видеотерминал алфавитно-цифровой.

УСО в ТВСО-1 обеспечивает: бесконтактную коммутацию на 60 каналов; контактную коммутацию на 16 каналов; коммутацию и

нормализацию сигналов низкого уровня; ввод-вывод позиционных, импульсных и инициативных сигналов; преобразование код-ток и код-напряжение.

Технические и программные средства ТВСО-1 ориентированы на выполнение следующих функций: сбор информации от датчиков в заданной последовательности и в заданном темпе; первичная и углубленная обработка информации по стандартным и специальным алгоритмам; индикация на пульте результатов измерения и расчетов, индикация и изменение границ контроля; индикация и регистрация сообщений о нарушении технологического процесса; периодическая печать; выдача аналоговых и дискретных управляющих воздействий на объект; обмен информацией с УВК.

В комплект поставки ТВСО-1 входит системное программное обеспечение, komponуемое и генерируемое по заказу потребителя. Подготовка программ пользователя осуществляется на инструментальном комплексе (СМ-2 или подобный ему). Могут быть использованы следующие языки программирования: МНЕМКОД СМ-2, ФОРТРАН, АЛГОЛ, БЕЙСИК, БЕЙСИК-РВ.

4.5.3. Управляющие вычислительные комплексы на базе микроЭВМ. Разрабатываемая агрегатированная микроЭВМ СМ-1800 предназначена для создания низовых подсистем АСУТП, распределенных систем управления, систем автоматизации лабораторных измерений и экспериментов, для подготовки данных, программирования и обучения.

ЭВМ создана на основе микропроцессора КР580ИК80А. В комплект микроЭВМ входят модули ввода аналоговых сигналов 0-5 В (МВВА), в числе которых 16-канальный коммутатор и АЦП интегрирующего типа; модули вывода аналоговых сигналов МВА (4 канала 0-5 мА, 0-10 В); модули компараторов уровня МКУ (8 каналов, 10 бит) и модули ввода-вывода дискретных и цифро-импульсных сигналов (4 типа модулей).

Функциональное деление задач АСУТП на информационно-вычислительные и управляющие находит свое отражение в вычислительном процессе. Задачи управления (особенно НПУ) требуют высокой надежности, обладают высоким приоритетом и имеют сравнительно ограниченную информационную базу. В противоположность этому информационно-вычислительные задачи имеют существенно



большую периодичность решения, требуют привлечения больших массивов данных, допускают смещение времени решения задачи. На сложных технологических агрегатах число контуров управления колеблется в основном в пределах 10-25 при общем числе информационных входов до 200-250 и более.

Использование этой особенности АСУТП позволило провести декомпозицию задач, решаемых АСУТП, и выделить три макромодуля, на базе которых может быть создано множество распределенных систем управления (PCY) — это регулирующий модуль (PM), диспетчерский модуль (DM) и вспомогательный модуль (BM). Во всех этих макромодулях используется процессор M2 и агрегатные модули микроЭВМ "Электроника-60".

Регулирующий макромодуль предназначен для автономной реализации задач автоматического управления технологическими процессами. С целью повышения надежности и сокращения затрат памяти в состав PM включают печатные и дисплейные устройства. Функции диалога реализуются специализированным пультом, совмещенным с инженерной панелью. При отсутствии или отказе ЭВМ верхнего уровня PM способен функционировать автономно. Он комплектуется в шести вариантах, различающихся набором модулей устройства связи с объектом (УСО). Набор модулей УСО позволяет вводить до 48 аналоговых сигналов при однопроводной коммутации (или 24 при двухпроводной), до 32 дискретных сигналов.

Диспетчерский макромодуль осуществляет централизованный контроль на уровне агрегата, участка или цеха, а также оптимизацию технологического процесса. DM использует информацию, поступающую от PM, а также от вспомогательных модулей BM-K, объединенных информационной магистралью.

В состав DM входят следующие модули: процессор M2, ПЭУ на 4K слов, ОЗУ на 28K слов, накопитель на магнитных дисках "Электроника НМД-70" емкостью 512 Кбайт, дисплей, печатающее устройство и УПО для связи с PM, BM и верхним уровнем системы.

Вспомогательный макромодуль имеет две модификации: BM-P для расширения возможностей регулирующего макромодуля и BM-K для сбора информации в системах централизованного контроля и передачи в диспетчерский макро-

модуль по магистрали. ВМ не имеет самостоятельных технологических функций и не предназначен для автономного использования (ВМ-Р даже не имеет самостоятельного выхода на магистраль, а работает под управлением РМ).

В состав ВМ-К входят модули процессора, ОЗУ на 4К слов, ПЗУ на 2К слов, канал машинного обмена (УПО), устройства аналогового входа на 256 входов, усилитель сигналов низкого уровня, устройства дискретного ввода на 256 входов. В зависимости от набора УСО ВМ-К имеет три варианта исполнения.

Основными составными частями семейства микроЭВМ "Электроника С5" являются микропроцессорный комплект БИС, одноплатные микроЭВМ, набор микропроцессорных функциональных модулей (МЭМ), однокристалльные микроЭВМ, многоплатные микроЭВМ, программное обеспечение и средства отладки программ.

Микропроцессорные функциональные модули семейства "Электроника С5" предназначены для расширения функциональных возможностей микроЭВМ по объему памяти, составу и количеству каналов ввода-вывода.

Модель "Электроника С5-02" является многоплатной микроЭВМ и представляет собой 16-разрядную машину с развитыми системами памяти и ввода-вывода. Главными особенностями микроЭВМ "Электроника С5-02" являются большой объем внутренней памяти (до 20 Кбайт), широкий набор устройств управления внешними объектами, наличие встроенного пульта управления, предназначенного для запуска, останова, индикации состояния микроЭВМ и выполнения режима отладки программ, наличие встроенного вторичного источника питания, полная конструктивная завершенность.

МикроЭВМ "Электроника С5-02" состоит из микропроцессора, запоминающего устройства, устройства ввода-вывода, пульта управления, генератора тактовых импульсов и источника питания. Микропроцессор состоит из арифметико-логического устройства (АЛУ), микропрограммного устройства управления (МУУ) и микропрограммного запоминающего устройства (МЗУ). АЛУ обеспечивает хранение и обработку информации, формирование адресов команд и чисел, переход к микропрограмме, МУУ обеспечивает формирование адресов и выборку микрокоманд из МЗУ для управления ра-

ботой всех устройств микроЭВМ. МЗУ предназначено для хранения микропрограмм системы команд.

Запоминающее устройство состоит из оперативного (ОЗУ) и постоянного (ПЗУ) запоминающих устройств общей емкостью до 20 Кбайт 16-разрядных слов.

Устройство ввода-вывода обеспечивает работу периферийных устройств ввода-вывода (перфораторов, фотосчитывателя, дисплея, устройства печати, телетайпа и др.).

"Электроника С5-12" является одноплатной моделью семейства микроЭВМ "Электроника С5" и предназначена для массового применения в системах локального контроля и управления. Главной функциональной ее частью является монокристалльный 16-разрядный микропроцессор. Внутренняя память состоит из ОЗУ емкостью 128 слов и ПЗУ емкостью 2048 слов.

Для построения на базе микроЭВМ "Электроника С5-12" систем с расширенными функциональными возможностями разработан набор микропроцессорных функциональных модулей (аналого-цифровой преобразователь, блоки сопряжения с периферийными устройствами, дисплей и др.).

Модель "Электроника С5-21" является одноплатной микроЭВМ, построенной на основе однокристалльного микропроцессора с высокой степенью интеграции элементов. Она имеет быстродействие 200 тысяч операций в секунду, емкость ОЗУ 256 слов и ПЗУ - 2048 слов.

МикроЭВМ "Электроника С5-12" и "Электроника С5-21" конструктивно выполнены в виде печатных плат и могут использоваться как встраиваемые микроЭВМ для управления станком, агрегатом или прибором.

#### 4.6. ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ АСУТП

Создание АСУТП от постановки задач до внедрения и опытной эксплуатации включает в себя следующие этапы:

Этап	Содержание
1	2
Технико-экономическое обоснование	Технико-экономическое обоснование объекта; формулировка исходных тре-

1	2
	<p>ований к системе и их технико-экономическое обоснование; подготовка ТЭО.</p>
<p>Техническое задание</p>	<p>Предварительное обследование автоматизируемого технологического процесса. Предпроектные научно-исследовательские работы. Эскизная разработка АСУТП. Разработка ТЗ на создание АСУТП.</p>
<p>Технический проект</p>	<p>Системотехнический синтез АСУТП. Аппаратурно-технический синтез АСУТП. Разработка заданий на проектирование в смежных частях проекта объекта, оборудования, не выпускаемого серийно, и заявок на разработку новых средств автоматизации. Разработка алгоритмов контроля, управления и функционирования АСУТП, информационного обеспечения АСУТП. Составление смет, ведомостей и при необходимости патентного формуляра. Сравнительный анализ разрабатываемой АСУТП и расчет ожидаемой экономической эффективности АСУТП (АТК) по проектным данным. Оформление технического проекта.</p>
<p>Рабочий проект</p>	<p>Разработка рабочей документации на техническое обеспечение системы. Составление заказных спецификаций. Разработка рабочей документации на программное и информационное обеспечение АСУТП и изготовление специальных программ на машинных носителях информации. Разработка эксплуатационной документации.</p>
<p>Внедрение (ввод в действие)</p>	<p>Подготовка объекта к внедрению АСУТП, включая выполнение строительных и монтажных работ. Наладка АСУТП. Опытная эксплуатация. Доработка системы по результатам опытной эксплуатации. Приемо-сдаточные испытания по вводу АСУТП в промышленную эксплуатацию.</p>
<p>Промышленная эксплуатация</p>	<p>Анализ функционирования. Определение фактической экономической эффективности, надежности и других эксплуатационных характеристик системы.</p>

#### 4.7. АСУТП ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

4.7.1. АСУТП непрерывной варки целлюлозы. Системы управления непрерывной варкой целлюлозы строятся как трехуровневые. Верхний (третий) уровень определяет задачи подсистемам второго и первого уровней. Системы верхнего уровня определяют поведение объекта при изменении производительности, сорта вырабатываемой целлюлозы и характеристик процесса (например, изменение качества загружаемой щепы). Системы второго уровня обеспечивают стабилизацию заданных качественных показателей выходного продукта и требуемого уровня щепы в аппарате. Системы первого уровня предназначены для управления комплексными параметрами объекта, удельным расходом белого щелока на варку, гидромодулем, коэффициентом разбавления (т.е. промывкой целлюлозы), температурой в верхней и нижней варочной зонах, выдувкой и расходом щепы, поступающей в варочный котел.

Управление расходом щепы. Целью данной подсистемы управления является поддержание расхода щепы, заданного подсистемами изменения производительности и управления уровнем щепы. Подача щепы в варочный аппарат регулируется изменением оборотов дозатора. Для калибровки дозатора взвешивается количество щепы, находящееся в полностью загруженном дозаторе, и измеряется число оборотов, за которое вырабатывается взвешенная щепа. Отношение количества щепы к числу оборотов дозатора называется весовым коэффициентом заполнения дозатора. В процессе работы системы этот коэффициент корректируется.

Управление удельным расходом щелоков. Подсистема поддерживает требуемое соотношение расхода активной щелочи к единице массы абсолютно сухой древесины. Задание подсистеме поступает от подсистемы управления изменением сорта выпускаемой целлюлозы и, в некоторых случаях, от подсистемы управления качественными показателями целлюлозы. Расход белого щелока вычисляется исходя из заданного значения удельного расхода массы абсолютно сухой древесины и лабораторных анализов концентрации щелоков, вводимых в УНК вручную.

Управление соотношением жидкость / абсолютно сухая масса. Под-

система поддерживает значение гидро модуля, рассчитываемого подсистемами управления изменением сорта целлюлозы, характеристик объекта и уровня щели. Расход черного щелока на варку определяется по заданному значению гидро модуля и по материальному балансу щелоков в аппарате.

Управление температурой в варочной зоне. Задание температуры варки определяется всеми подсистемами верхнего уровня и корректируется подсистемой управления качественными показателями. К системе предъявляются высокие требования по точности регулирования заданной температуры, что объясняется высокой чувствительностью выходных параметров процесса к изменению температуры; регулируемой является температура на выходе из подогревателя. Управляющее воздействие (в режиме нормальной эксплуатации) – расход пара в подогревателе.

Управление промывкой целлюлозы. Цель системы – поддержание требуемой чистоты, измеряемой ковенным показателем – коэффициентом разбавления, т.е. отношением расхода промывающего щелока к расходу целлюлозы через зону промывки.

Управляющее воздействие – расход черного щелока, отображаемого в верхний расширитель. Для поддержания постоянства давления в котле при изменениях отбора щелока регулируется поток холодной выдувки.

Расчетный коэффициент разбавления определяется из материального и теплового баланса промывной зоны. Значение потока целлюлозной массы через промывную зону рассчитывается по показателям датчиков концентрации и расхода, установленных на выходе из котла.

Противоточный расход щелока на промывку определяет конечную точку реакции дегитнизации, и изменение его может привести к колебаниям числа Каппа. Расход щелока на экстракцию определяется как оптимальное значение, обеспечивающее требуемую степень промывки при допустимых колебаниях качества целлюлозы.

Управление выдувкой целлюлозы. Подсистема должна поддерживать постоянные условия в линии выдувки путем стабилизации отношения объемного и массового расхода целлюлозы или поддержания заданной концентрации реакционной

массы. Задание подсистеме выдается подсистемами управления производительностью и уровнем щепы в котле. Управляющим является расход выдаваемой массы, который изменяется таким образом, что он величина его была пропорциональна расходу щепы. При этом средняя концентрация целлюлозы в выдаваемой массе остается постоянной.

Управление уровнем щепы в варочном котле. Подсистема поддерживает заданный уровень щепы в аппарате, обеспечивающий постоянство времени пребывания щепы в котле и, следовательно, уменьшение колебаний качественных показателей целлюлозы. Для управления уровнем в системе используются показания амперметра, установленного в цепи нагрузки электродвигателя лопастного датчика. Управляющее воздействие подсистем является заданием для подсистемы управления выдувной массы.

В аварийных режимах в качестве управляющих воздействий используются расход черного щелока для изменения соотношения жидкость-древесина и расход черного щелока, подаваемого на противоточную промывку целлюлозы.

Управление варкой (жесткостью) целлюлозы. Целью системы является обеспечение постоянства качественных показателей целлюлозы. Все существующие системы для поддержания требуемых значений жесткости целлюлозы используют принцип обратной связи. При синтезе систем принимается следующее допущение: если удельный расход щелока и гидромодуль постоянны, а время пребывания щепы в аппарате не меняется, то качество целлюлозы будет зависеть только от температуры. Тогда по отклонению измеренного значения жесткости от заданного рассчитывается требуемая температура варки нижней подогревательной зоны, которая является заданием для контура регулирования температуры.

Основной целью подсистемы управления высшего уровня является управление качеством получаемой целлюлозы в переходных режимах. Эта задача может быть решена упреждающим регулированием основных переменных процесса при плановом изменении производительности установки. При аварийном изменении производительности качество ведения процесса нарушается.

# Уровни управления

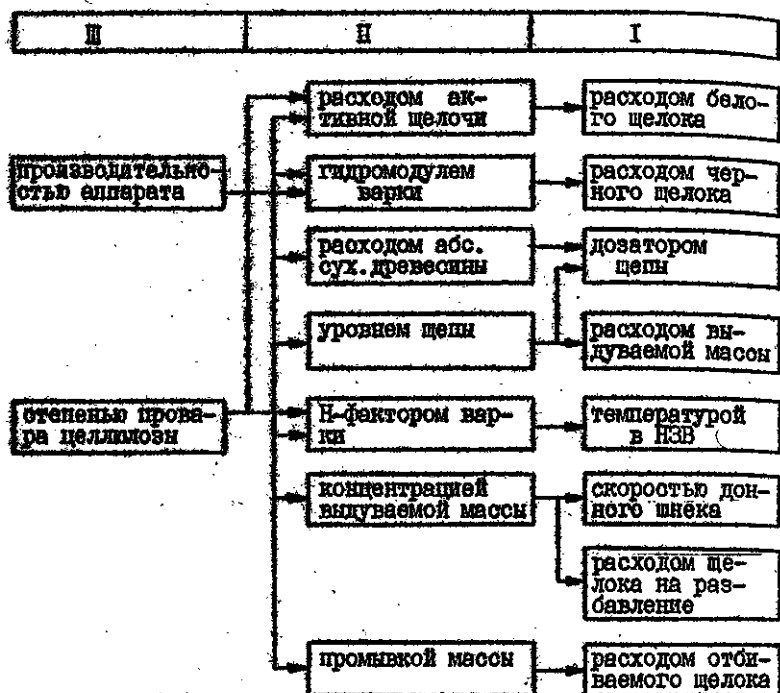


Рис.109. Схема управления процессом непрерывной варки целлюлозы.

АСУТН непрерывной варки, работающая на Котласском ЦБК [36], решает следующие функциональные задачи (рис.109): сбор и обработка информации о процессе; расчет параметров технологического режима варки (расход выдуваемой массы, расход абсолютно сухой древесины, поступающей в варочный аппарат, гидро модуль варки, влажность щепы, поступающей в пропарочную камеру, жесткость целлюлозы, Н-фактор варки), не поддающихся непосредственному измерению; стабилизация расхода активной щелочи и гидро модуля варки; управление расходом варочного щелока; регулирование уровня щепы в котле; регулирование температуры в верхней зоне нагрева; регулирование кратности циркуляции щелоков



в зонах нагрева; стабилизация и автоматическое управление жесткостью целлюлозы при изменении производительности котла, заданий по расходу активной щелочи, при переходе на выпуск целлюлозы другого сорта; управление потоком щелока в зоне диффузионной промывки; регулирование концентрации выдуваемой целлюлозной массы; управление выгрузкой целлюлозы из котла и нагрузкой разгрузочного устройства (донного шнека).

Эти функциональные задачи решаются следующим образом.

Стабилизация расхода активной щелочи и гидромодуля варки осуществляется путем расчета и выдачи заданий регуляторам расхода белого и черного щелока по данным материальных потоков древесины, щелочи и жидкости. Уровень щепы в котле регулируется расходом выдуваемой массы. Задание регулятору расхода выдуваемой массы формируется с учетом уровня щепы, задания по концентрации выдуваемой массы, прогнозируемого изменения уровня щепы от предыдущего изменения расхода выдуваемой массы.

Температурный режим верхней зоны нагрева котла определяется из условий нормальной работы нижней зоны нагрева. Управление расходами щелоков в зонах нагрева реализуется по принципу прямого цифрового управления на линиях циркуляции с целью поддержания заданной кратности циркуляции.

Автоматическое управление жесткостью целлюлозы при переходе на новую производительность, выпуск целлюлозы другого сорта или при изменении задания по расходу активной щелочи реализуется путем расчета требуемого  $H$ -фактора для заданных значений расхода активной щелочи и жесткости целлюлозы. Поддержание требуемого  $H$ -фактора осуществляется изменением конечной температуры варки.

Система управления потоком щелока в зону диффузионной промывки регулирует отбор щелока в верхний расширитель для обеспечения заданного соотношения потока промывного щелока и потока целлюлозы в зоне промывки.

В типовой состав системы "Аккурей-4200", предназначенной для управления процессом непрерывной варки целлюлозы в аппарате "Камор", входят следующие основные устройства: мини-ЭВМ, станция оператора, печатающее устройство, источник питания, кроссовый шкаф, станция индикации данных, видеокамеры и телетайпы [13,32].

Для управления процессом применяется ЭВМ с объемом памяти 16 К, 16-разрядных слов на магнитных сердечниках и 262 К слов на дисках.

Станция оператора выполнена в виде стойки. В верхней части стойки размещается табло аварийных сигналов: общий сигнал, по которому оператор должен нажать клавишу аварийного вызова на панели телеэкрана, сигнал изменения производительности, сигналы предельных нижнего и верхнего уровня щепы в аппарате, сигнал отсутствия данных, необходимых для нормальной работы системы управления, сигнал неисправности системы. Ниже табло размещается телеэкран, на который может быть вызвано семь рапортов: аварийный, текущие данные процесса, обновляемые каждые 5 с, текущие средние данные за последние 10 ч (обновляются каждый час), данные об изменении состояния объекта, данные о сорте целлюлозы, заданное и действительное значение регулируемых параметров; параметры процесса, которые могут быть вызваны на цифровую индикацию.

Пульт вводов данных служит для ввода лабораторных анализов и заданных значений параметров. Для ввода данных необходимо нажать кнопку с адресом параметра, набрать значение параметра на цифровом табло и нажать кнопку ввода.

Печатающее устройство имеет возможность выдавать пять рапортов: аварийный, ежедневный, печатный видеорапорт, рапорт сорта целлюлозы, рапорт текущих данных.

АСУ непрерывной варкой решает следующие задачи по управлению: расходом щепы, удельным расходом щелоков, гидромодулем, температурой в варочной зоне, промывкой целлюлозы, уровнем щепы в котле, степенью делигнификации (жесткостью) целлюлозы. Управляющими воздействиями являются расход щепы и щелоков в котел, расход пара в подогреватель, расход черного щелока на разбавление, расход целлюлозы на выдувку.

В системе управления предусмотрен ввод лабораторных анализов и адаптация модели по данным лабораторных анализов.

Внедрение системы управления позволяет увеличить задание по жесткости целлюлозы и производительность, а также уменьшить расход щелоков и пара на варку.

4.7.2. АСУТП периодической варки целлюлозы. АСУТП периодической варки целлюлозы строится как децентрализованная система.

Децентрализованные комплексы управления представляют собой набор блоков сбора, обработки, управления и отображения информации, объединенных едиными каналами связи. Основу построения этих систем оставляют программируемые контроллеры, а функции оптимизации и координации может выполнять как мини-ЭВМ, так и микроЭВМ.

Наиболее важными для достижения требуемых показателей качества целлюлозы являются точность поддержания заданного температурно-временного режима варки и возможность контроля степени завершенности химических превращений процесса.

Система решает следующие задачи:

1. Управление температурно-временным режимом нагрева варочного котла; исходными данными для решения этой задачи являются задания по техническому режиму (конечная температура и длительность заварки), вводимые оператором-варщиком; данная задача решается в режиме прямого цифрового управления.

2. Управление непосредственно процессом варки (степенью завершенности процесса); исходным параметром для этой задачи является значение интегрального фактора варки; задача решается в режиме "совета оператору".

Микроконтроллер может быть использован для решения этих задач как в одном котле, так и в группе до пяти котлов.

АСУТП варки целлюлозы "Супер-корд" управляет 24 варочными котлами, при этом система измеряет 134 аналоговых и 270 дискретных сигналов и управляет 48 каналами [28].

Контроль за процессами варки осуществляется на всех технологических стадиях: загрузки щепы, заливки воды, гидролизной заварки и варки, пережима гидролизата, заливки щелоков, пропитки, сульфатной заварки и варки.

Управление производится на стадиях: гидролизной заварки и варки; пропитки сульфатной заварки и варки. Оно основано на использовании интегрально-кинетических критериев, полученных в результате реакций, протекающих на стадиях гидролизной и сульфатной варки.

В АСУТП "Супер-Корд" применен модульный принцип построения алгоритмического обеспечения. Задачи системы решаются следующими алгоритмическими модулями: расчет начальных условий процесса; прямое цифровое управление температурно-временным режимом, одувками парогазовой фазы; управление окончанием стадии гидролизной и сульфатной варки (режим совета); подстройка математической модели для прогнозирования качественных показателей целлюлозы; подготовка и выдача документации; расчет технико-экономических показателей работы варочного цеха.

Комплексо технических средств АСУТП "Супер-Корд" включает управляющий вычислительный комплекс (УВК) СМ-2 (базовый комплекс № 6), устройства связи с объектом из номенклатуры АСБТ, специализированные технологические пульты, датчики, преобразователи, исполнительные механизмы.

Для наиболее рационального решения задач общения операторов-технологов (барщиков) с системой управления разработаны специализированные пульты с автономным техническим и программным обеспечением. Пульты связаны с УВК СМ-2 через модули и установлены непосредственно в варочном цехе. Пульт состоит из видеодисплея, устройства цифровой индикации и клавиатуры ввода-вывода. Вся необходимая информация о ходе технологического процесса вызывается на экран нажатием одной технологической клавиши.

АСУТП "Автокук Нокia PP 6505". Система "Автокук PP 6505" фирмы Нокia (Финляндия) служит для управления процессом периодической варки сульфатной целлюлозы. Она выполняет следующие функции:

- запускает транспортеры;
- производит взвешивание щепы;
- измеряет влажность щепы;
- дозирует расход щелока (черного и белого);
- регулирует расход пара.

В процессе варки система моделирует реакцию делигнификации, вычисляя интеграл относительной скорости реакции (Н-фактор). По достижении Н-фактором заданной величины производится выдувка.

При помощи системы "Автокук" достигается:

- увеличение производительности не менее чем на 8%;
- снижение расхода пара на 10%;
- снижение колебания числа Каппа до  $\pm 2$  ед.;
- равномерное потребление пара варочным цехом;
- регулирование скорости варки;
- контроль процесса варки.

Система выдает также рапорты о варке.

Благодаря этим преимуществам система "Автокук" окупается в течение одного года. Она предназначена для восьми варочных котлов, но при необходимости может быть расширена и на большее их число.

Заполнение котла производится на основании сведений о весе и влажности щепы, а также количестве и концентрации химикатов. Вес щепы определяется с помощью ленточных весов. Влажность щепы измеряется датчиком влажности. Относительный расход черного и белого щелока рассчитывается в зависимости от сорта древесины; результат либо выдается варщику, который производит дозировку (режим "совет оператору"), либо УЭМ непосредственно производит дозировку щелока на варку (режим автоматического управления).

Для регулирования процесса варки необходимо знать степень дегидратации щепы в процессе варки. Непосредственным измерением это получить нельзя из-за отсутствия приборов. В системе "Автокук" используется моделирование процесса, с помощью которого можно определить состояние реакции на каждый момент. Скорость же реакции определяется температурой в соответствии с формулой Аррениуса.

Определяя в каждый момент  $H$ -фактор, система позволяет вовремя прекратить варку, т.е. получить целлюлозу с заданным числом Каппа, независимо от температуры и времени варки.

Обеспечивается более равномерное потребление пара варочным цехом, так как выход на рабочую температуру производится не одновременно во всех котлах, а последовательно, по одному.

В системе "Автокук" используется УЭМ с запоминающим устройством на 8192 слова. Входные сигналы: 224 релейных входа и 100 аналоговых, подключаемых к УЭМ через аналого-цифровые преобразователи. Выходные сигналы: 100 релейных выходов и 10 ана-

логовых для управления паровыми вентилями. Кроме того, в состав системы входит станция ручного управления.

Система "Автокук" имеет следующую периферийную технику:

- печатальную машинку (скорость 10 знаков в секунду);
- станцию ручного управления;
- индикатор Н-фактора;
- индикатор расхода щелочи;
- блок программ (кассетный магнитофон).

УМ работает в реальном масштабе времени.

Входные сигналы:

а) аналоговые:

- напряжение: 0-10 мВ; 0-100 мВ; 0-1 В; 0-10 В;
- ток: 0-10 мА; 4-20 мА; 0-50 мА; 10-50 мА;
- сопротивление: 0-1000 Ом;

б) цифровые: реле с контактным сопротивлением не более 60 Ом.

Выходные сигналы:

а) аналоговые: 0-10 мА, сопротивление нагрузки не более 3 кОм, 4-24 мА, сопротивление нагрузки не более 1,5 кОм, 10-50 мА, сопротивление нагрузки не более 600 Ом;

б) импульсные: 24 В, 50 Гц;

в) цифровые: 200 В (постоянного тока), 2 А, 100 ВА.

Для возможности ручного управления имеется переключатель "Ручное - Автокук", расходомеры пара, самописцы температуры и индикаторы паровых вентилях.

**4.7.3. АСУТП отбелки целлюлозы.** Автоматизированная система управления технологическим процессом отбелки целлюлозы предназначена для стабилизации качества получаемой целлюлозы, увеличения выхода парового оорта, оптимизации процесса отбелки и для выполнения информационных функций.

АСУТП отбелки целлюлозы решает следующие задачи: сбор и обработка оперативной информации на всех этапах процесса, адаптация коэффициентов математической модели процесса отбелки, расчет расходов химикатов, времени пребывания и уровней целлю-

---

Рис. 110. Состав специального математического обеспечения АСУТП отбелки целлюлозы.

Специальное  
математическое  
обеспечение

Программа сигнализации о включении комплекса
Программа ввода даты и времени о ВВУ
Программы расчета даты и текущего времени
Программа ввода параметров с аналоговых датчиков
Программа формирования интегрального массива
Программа расчета концентрации мас- сы на входе цеха
Программы расчета уровней и дли- тельности реакций в баках
Программа расчета расхода гипохлори- та на ступени предварительной обработки
Программа расчета расхода хлора на ступени хлорирования
Программа расчета расходов химика- тов
Программа расчета параметров для ра- порта технолога-оператора
Программа формирования массивов ус- редненных параметров
Программа выдачи управляющих воздей- ствий на регуляторы
Программа печати рапорта и адаптируе- мых коэффициентов
Программа сигнализации о нарушениях
Программа печати выбранной области памяти
Программа общения технолога-операто- ра с УМК
Программа адаптации коэффициентов модели
Программа расчета поправки по лабора- торному анализу

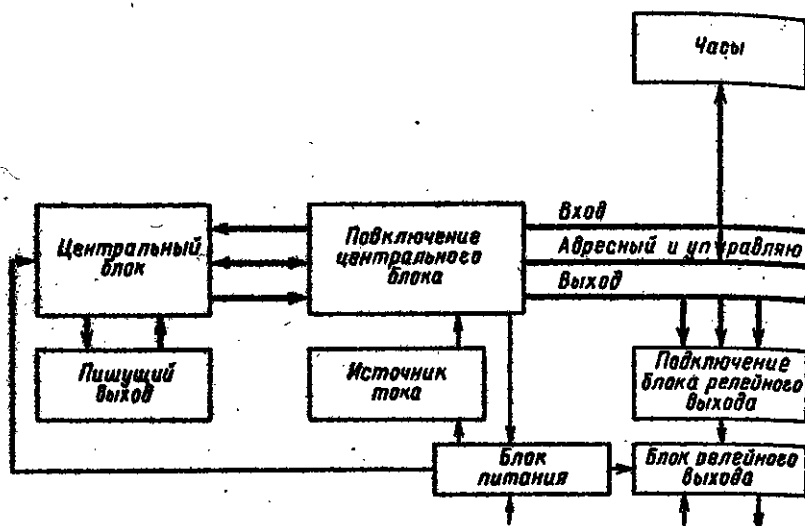


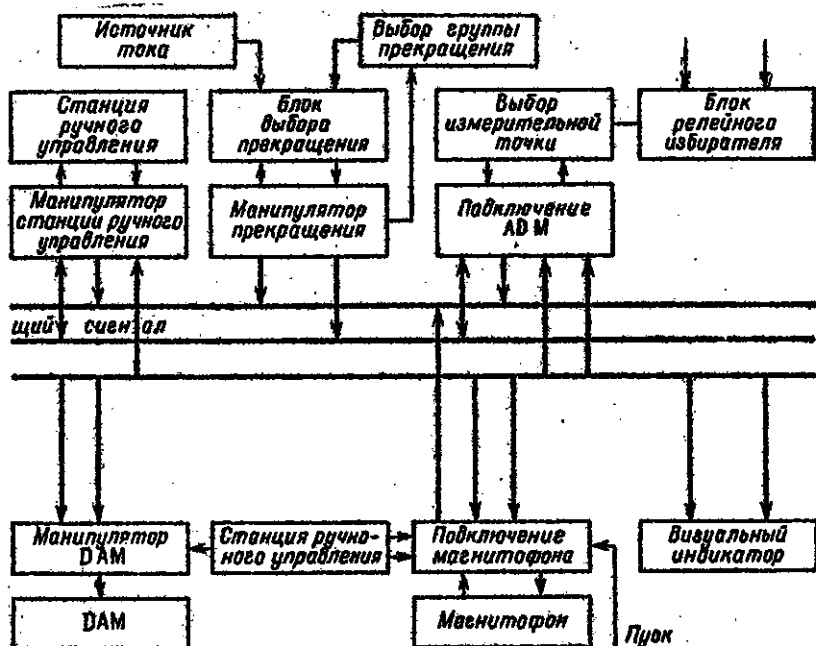
Рис. 134. Блок-схема  
ADM — аналого-цифровой преобразователь;

лозы в башнях на всех ступенях отбелки, управление дозировкой химикатов и уровнями в отбельных башнях, расчет технико-экономических показателей и выдача информации, сигнализация нарушений, организация общения технолога-оператора с УБК, печать рапорта и др.

АСУПН отбелки целлюлозы включает в себя объект управления (технологический процесс отбелки и оборудование для его проведения) и комплекс технических средств (КТС), состоящий из управляющего вычислительного комплекса (УВК), датчиков, регуляторов и устройства связи с объектом (УСО).

КТС — это совокупность УВК, устройств получения, переработки и выдачи информации и исполнительных устройств, обеспечивающих выполнение всех функций системы. УВК является осно-





аппаратуры системы "Автоблэтч".

ДАМ – цифро-аналоговый преобразователь.

вой КТС и реализует функции системы в соответствии с программным обеспечением. В качестве УВК используются обычно М-6000, СМ-2, СМ-2М, ТВСО-1 и др.

УОО предусматривает ввод 39 аналоговых сигналов и управление 15 параметрами (для семиступенчатой отборки целлюлозы).

Программное обеспечение реализует вычислительную часть АСУТП. Оно состоит из общего математического обеспечения, реализуемого операционной системой, и специального математического обеспечения, представляющего собой набор рабочих программ (рис. 140).

Система "Автоблэтч РР 6506" разработана фирмой Ноккиа Электроника (Финляндия) и предназначена для стабилизации качественных показателей целлюлозы и сокращения затрат химикатов

при изменении жесткости небеленой целлюлозы и производительности. Система обеспечивает стабилизацию качественных показателей целлюлозы на первых ступенях отбелки, управление процессом дообелки производится с помощью локальных САУ (рис. 111).

Система "Автоблitch" обеспечивает уменьшение колебаний показателей целлюлозы после отбелки и снижение расхода химикатов. При колебаниях жесткости небеленой сосновой целлюлозы  $\pm 4$  Каппа система "Автоблitch" обеспечивает стабилизацию жесткости целлюлозы после 1-й ступени щелочения с точностью  $\pm 0,4$  Каппа. После гипохлоритной отбелки колебание белизны целлюлозы не превышает  $\pm 1-2\%$  SCAN, а изменение белизны окончательного продукта в пределах  $\pm 0,2\%$  SCAN, пределы изменения вязкости  $\pm 20$  SCAN. Экономия по расходу хлора составляет 6 кг на тонну березовой целлюлозы и 12 кг на тонну сосновой, расход щелочи сокращается на 2-3 кг на тонну целлюлозы.

Расход хлора рассчитывается в зависимости от рода древесины (сосна или береза) и сигнала "Полярокс", измеряемого в нижней части башни хлорирования. Способ "Полярокс" представляет собой потенциостатический способ измерения, при помощи которого можно определять содержание окисляющих и восстанавливающих реагентов. Способ "Полярокс" незаменим в случае, если для отбелки используется морская вода, хлориды которой мешают измерению ОВП. Способ "Полярокс" предусматривает установку трех электродов: измерительного, вспомогательного и электрода сравнения. Между измерительным электродом и электродом сравнения поддерживается постоянный потенциал, называемый установочным. Величина этого потенциала зависит от вида химиката. Установочный потенциал поддерживается внешним током, а величина тока линейно зависит от концентрации измеряемого химиката.

В холодное время года регулируется температура ступени хлорирования воздействием на расход теплой разбавляющей воды, поступающей в бассейн с волокнистой массой высокой концентрации. Задание по температуре рассчитывается в зависимости от сорта древесины. В теплое время года вместо температуры хлорирования регулируется концентрация массы.

На 1-й ступени щелочения регулируется расход щелочи. Задание регулятору расхода рассчитывается в зависимости от сорта древесины.

На 2-й ступени гипохлоритной отбелилки дозировка химикатов производится с помощью самостоятельной системы управления в зависимости от белизны целлюлозы после 1-й ступени гипохлоритной отбелилки. Такое регулирование белизны без обратной связи предъявляет повышенные требования к точности математической модели и измеряемых параметров.

Все величины, связанные с режимом работы УВК (производительность, заданное число Каппа, сорт древесины), задает оператор при помощи станции ручного управления. Предусмотрен контроль параметров по вызову. Программа в УВК вводится с магнитной ленты.

В конце каждой смены выдается на печать сменный рапорт о расходе химикатов.

Входные аналоговые сигналы:

- напряжение: 0-10 мВ, 0-100 мВ, 0-1 В, 0-10 В;
- ток: - 0-10 мА, 4-20 мА, 0-50 мА, 10-50 мА;
- сопротивление: - 0-1000 Ом.

Подключение аналоговых сигналов к УВК производится через аналого-цифровые преобразователи (АДМ).

Цифровой вход: реле, максимальное контактное сопротивление 60 Ом.

Выходные сигналы:

- а) импульсные: 24 В, 50 Гц;
- б) релейные: 200 В, постоянный ток, 2 А, 100 ВА;
- в) аналоговые: 0-10 мА (сопротивление не более 3 кОм), 4-20 мА (1,5 кОм), 10-50 мА (600 Ом).

Выход с УВК на регуляторы осуществляется с помощью цифро-аналоговых преобразователей (ДАН).

Недостатком системы "Автоблитч" является то, что добелку целлюлозы на всех ступенях кроме 2-й гипохлоритной, регулируют вручную при отсутствии объективной информации о потребности в химикатах.

4.7.4. АСУТП производства бумаги. Подсистема управления размолом волокнистой суспензии. Объектом управления является многоступенчатая технологическая линия размола волокнистых полуфабрикатов, состоящая из последовательных аппаратов (мельниц). Характером технологического процесса, связанным с наличием од-

континных степеней размола, вызвано разделение управления процессом на три группы задач: задачи управления каждой мельницей, задачи согласования качества размола на выходе мельниц друг с другом и о производительностью [17, 43].

Автоматическая система управления процессом размола имеет иерархическую многоконтурную структуру и осуществляет управление на уровне стабилизации и оптимизации процесса.

Нижний контур системы обеспечивает прямое цифровое управление расходом массы на ступени размола и мощностью на каждой мельнице. Типовой алгоритм управления учитывает нелинейность объекта, люфт и гистерезис исполнительных механизмов.

Количественной характеристикой качества размола являются степень помола на выходе последней мельницы и график размола на всей ступени, включающей несколько мельниц. Эти технологические переменные поддерживают на заданном уровне путем стабилизации соответствующих значений удельной полезной мощности размола  $q_i$  на каждом аппарате. При этом степень помола на выходе ступени размола определяется суммарной удельной полезной мощностью, а график размола массовыми величинами, характеризующими долю участия  $\beta_i$  каждого аппарата в процессе размола:

$$\beta_i = q_i / \sum_{i=1}^n q_i$$

где  $n$  — число аппаратов в процессе размола.

При стабилизации удельной полезной мощности используется информация о датчиков концентрации и расхода масс. Мощность на каждой мельнице корректируется в зависимости от необходимой удельной мощности на всей ступени и долей участия каждой мельницы в процессе размола. На этом же уровне иерархии решается задача автоматического перераспределения долей участия мельниц. Алгоритм перераспределения автоматически рассчитывает новое значение долей участия всех мельниц при изменении необходимой доли участия одной или нескольких из них таким образом, чтобы сумма всех долей участия равнялась единице.

Следующий контур системы осуществляет управление степенью помола на выходе отдельной ступени размола. Разработанная

подсистема осуществляет коррекцию суммарной мощности на этой ступени, обеспечивая заданное качество стабилизации и желаемый вид переходного процесса при целенаправленном изменении заданного значения степени помола. Для обеспечения требуемой точности управления в системе осуществляется автоматическая калибровка датчиков степени помола, установленных на входе и выходе ступени размола. С помощью пробоотборника датчика степени помола микропроцессор определяет время заполнения массой специального измерительного полого цилиндра, а затем, используя адаптивную статическую модель датчика, рассчитывает действительное значение степени помола в зависимости от полученного времени фильтрации. Дрейф модели датчика компенсируется алгоритмом стохастической аппроксимации.

При управлении графиком размола используется адаптивная математическая модель процесса, характеризующая связь прироста степени помола на ступени с удельной полезной мощностью на каждой мельнице.

Выбор оптимального режима размола осуществляется на верхнем уровне управления. Задача оптимизации предусматривает нахождение оптимального графика размола, обеспечивающего минимальные затраты энергии.

Оптимальные значения степени помола после каждой мельницы и в конце ступени определяются каждый раз, когда изменяются параметры размола или допустимый диапазон прироста степени помола на отдельной мельнице или на всей ступени.

Таким образом, рассматриваемая автоматическая система управления позволяет обеспечить стабилизацию качества размола как на отдельных мельницах, так и на всей ступени размола; гибкость управления при целенаправленном изменении производительности и качества массы в зависимости от производственной программы; выбор и поддержание оптимального режима размола, обеспечивающего получение бумаги с заданными свойствами. Система управления реализуется с помощью многосплатной микроЭВМ "Электроника С5-02", схема которой включает микропроцессор, запоминающее устройство, БВУ, пульт управления, генератор тактовых импульсов, источник питания.

В состав технических средств системы входит видеоконтрольное устройство (ВКУ Квант-М) для выдачи алфавитно-цифровой информации на электронно-лучевую трубку, специализированное устройство ввода-вывода цифровой информации в УИМ, специализированное устройство для выдачи число-импульсных сигналов управления исполнительными механизмами процесса. Все указанные технические средства, включая УИМ, встроены в специализированный пульт оператора, установленный непосредственно на объекте. С помощью пульта оператора осуществляется ввод-вывод цифровой и вывод алфавитно-цифровой информации по качеству работы системы управления, включение и отключение задач управления, дистанционное управление параметрами процесса.

Децентрализованное управление размолом в линиях предусматривает использование микроЭИМ для управления отдельными мельницами и групповой УИМ более высокого уровня для управления работой линии в целом. В качестве групповой УИМ может быть использована также микроЭИМ с расширенным пакетом прикладных программ. В свою очередь, групповая УИМ может быть связана с УИМ, обслуживающей поток производства бумаги.

Общая цель автоматического управления линией - обеспечение требуемых показателей качества размола на выходе линии размола при минимизации расхода электроэнергии на размол на всех режимах работы.

В автоматизированных линиях размола дополнительно обеспечивается возможность программного пуска (останова) основного оборудования, защита его в аварийных ситуациях и сигнализация состояния.

В децентрализованной системе вычислительная техника первого уровня (т.е. уровня управления отдельными мельницами) обеспечивает решение следующих задач:

- программного управления электрооборудованием мельницы в режимах пуска, останова и при авариях;
- управление общей мощностью размола данной мельницы при выходе ее на заданный режим после пуска линии;

- управление общей мощностью размола данной мельницы при изменениях задания по мощности, вносимых оператором или вводимых от групповой УЭМ более высокого уровня;

- сигнализация состояния оборудования мельниц (предупредительной и аварийной).

В групповой УЭМ второго уровня решаются задачи, связанные с управлением линией в целом;

- определение необходимого количества мельниц, которые должны быть включены в работу исходя из технологического регламента на выпускаемую бумагу и состояния мельниц (например, с учетом нахождения мельниц в ремонте);

- программное управление пуском (остановом) размольной линии;

- выдача заданий по мощности размола в подчиненные системы первого уровня для их отработки после пуска линии;

- управление расходом массы в линии размола при постоянной производительности;

- управление степенью помола на выходе линии при использовании прямых методов измерений;

- контроль степени помола на выходе отдельных мельниц линии и на выходе всей линии с использованием модели прогнозирования степени помола;

- проверка достоверности модели прогнозирования и при необходимости ее коррекция;

- управление степенью помола на выходе линии по модели прогнозирования в случаях, когда невозможно прямое измерение степени помола;

- управление размолом по сигналам внешней коррекции;

- управление размолом по минимуму удельного расхода электроэнергии на разمول.

Перечисленные задачи относятся к стационарному режиму работы линии, когда ни вид сырья, ни производительность линии не изменяются.

В переходных режимах состав дополнительных задач зависит от характера режима. Если изменяется только производительности линии с сохранением степени помола на выходе до изменения производительности, то дополнительно решаются следующие задачи:

- программное изменение расхода через линию;
- формирование заданий по мощности размола для отдельных мельниц в соответствии с новым значением расхода и ввод этих заданий в системы первого уровня для их обработки. Расчет заданий производится из принятых критериев управления (с оптимизацией удельного расхода энергии на размол или без оптимизации).

Если изменяется производительность линии без изменения вида перерабатываемого волокна и при этом устанавливаются новые требования к степени помола массы, то кроме программного управления расходом решается задача формирования новых заданий по мощности размола отдельных мельниц с учетом новых значений расхода и степени помола на выходе линии размола.

Подсистема управления производством бумаги на БДМ [40]. Автоматизированная система управления обеспечивает выбор и поддержание композиционного состава бумажной массы и оптимальных значений поверхностной плотности и влажности бумажного полотна. Система построена по функциональному принципу и выполняет информационные, управляющие и вспомогательные функции.

Информация о процессе поступает в УИМ автоматически и через пульт ручного ввода. Автоматическая информация вводится в УИМ с 70 аналоговых, дискретных и кодовых датчиков. С помощью вычислительной машины определяется соотношение между скоростями сетки и истечением волокнистой массы из напорного ящика, рассчитывается мощность на сетководущем и гауч-валах, процент целлюлозы и оборотного брака и композиции бумажной массы.

Для оценки эффективности процесса определяется время, место и длительность каждого обрыва бумаги, суммарная продолжительность холостого хода и простоя бумагоделательной машины, средняя скорость, производительность и удельные затраты пара и волокна. Информация обслуживающему персоналу и руководству цеха выдается на цифровое табло пульта технолога и печатающую машинку.

Управляющие функции подчинены задаче непосредственного управления величиной  $M$  — массой  $1 \text{ м}^2$  бумаги, влажностью  $w$



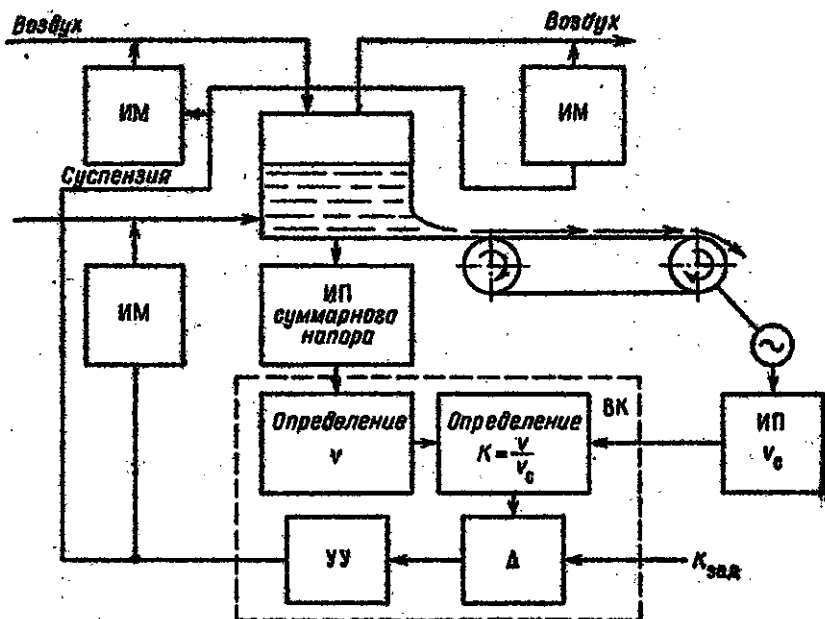


Рис.112. Автоматическое управление соотношением скорости сетки  $v_0$  и истечения массы из напорного ящика  $U$ .

и композиционным составом, соотношением скоростей  $K_{\text{зад}}$ . Управление осуществляется автоматически, минуя оператора, с помощью систем цифрового и аналого-цифрового управления (рис.112-114). Управляющими функциями являются: взаимосвязанное много-режимное управление массой и влажностью бумажного полотна, включающее управление сканированием датчика массы  $1 \text{ м}^2$  и влажности, определение при сканировании поперечного профиля, нахождение оптимальных значений массы  $1 \text{ м}^2$  и влажности; управление композиционным составом бумаги.

Вспомогательные функции системы подчинены задаче контроля исправности функционирования самой АСУТП. Эти функции включают программно-логический контроль входной, выходной информации и управляющих воздействий, тестовый контроль сохранения информации в ОЗУ и исправности технических средств.

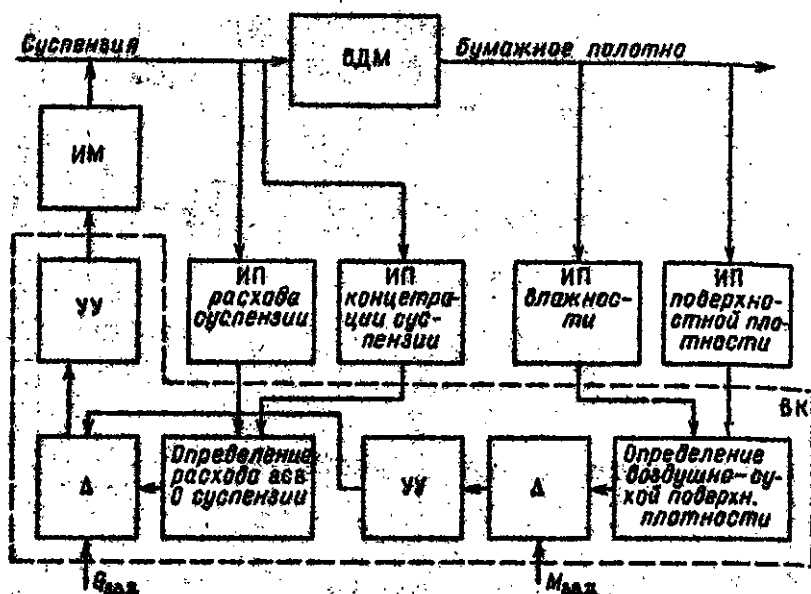


Рис. 113. Автоматическое управление поверхностной плотностью бумажного полотна.

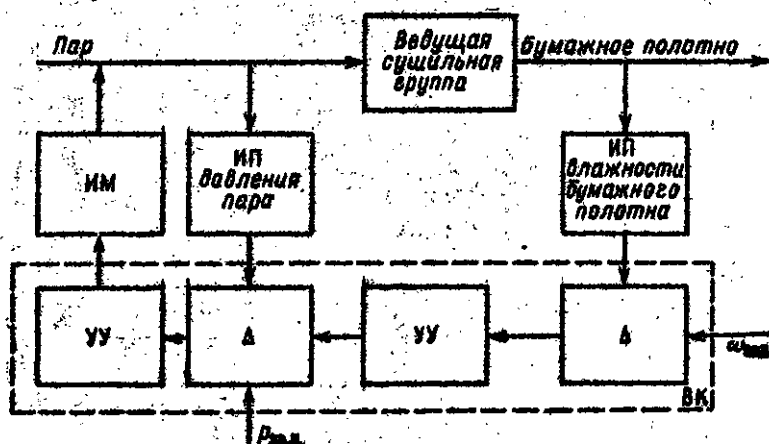


Рис. 114. Автоматическое управление влажностью бумажного полотна.

Система состоит из управляющей вычислительной машины с выходными аналоговыми и релейными блоками, специализированного КТС обмена информацией между УВМ и оператором-технологом специализированного устройства "код-перемещение" для управления электрическим исполнительным механизмом, периферийной контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуры (рис.115).

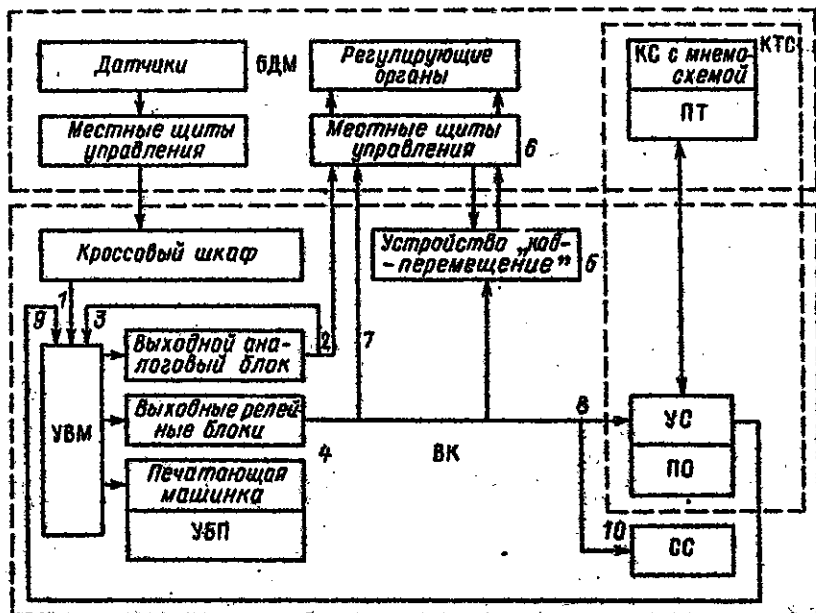


Рис.115. Техническая структура АСУТН БДМ.

КТС обеспечивает ввод в УВМ лабораторных данных и информации, необходимой для изменения технологического режима, осуществляет вывод из УВМ по требованию информации на цифровое табло и сигнализацию на мнемосхеме выхода технологических переменных за установленные пределы. В его состав входит пульт технолога (ПТ) и кроссовая стойка (КС) с мнемосхемой, устанавливаемые в мокрой части бумагоделательной машины; пульт оператора (ПО) и устройство связи (УС), устанавливаемые в помещении вычислительного центра. Управление работой комплекса, запоминание исходной информации до обращения в УВМ, организа-

для приема и выдачи информации по сигналам обращения осуществляется устройством связи (УС).

Связь КТС с УВМ осуществляется через выходные релейные блоки 8 и дискретные входы 9 устройства связи УВМ с объектом (УОО).

Входная информация 1 поступает в вычислительную машину с аналоговых и дискретных датчиков через шиты управления, на которых монтируются устройства локальной автоматики, преобразователи и ключи перехода с ручного на автоматическое от УВМ управление.

Управление процессом осуществляется через устройство "код - перемещение" и выходные аналоговые и релейные блоки. Аналоговый блок используется для прямого цифрового управления расходами целлюлозы, древесной массы, оборотного брака и аналого-цифрового управления влажностью. Связь четырех аналоговых каналов с тремя регулирующими органами и регулятором давления пара в третьей сушильной группе осуществляется по линиям связи 2 через кроссовый шкаф и местные шиты управления, в которых установлены электропневмопреобразователи. С целью программной проверки исправности аналогового блока выходные сигналы связаны с УСО 3. Устройство "код - перемещение" 5 предназначено для ручного и автоматического от УВМ управления задвижкой в системе прямого цифрового управления плотностью. Автоматическое управление осуществляется через выходной релейный блок 4, ручное - через местный шит управления 6.

Управление скапированием датчика плотности и влажности по ширине полотна производится автоматически от вычислительной машины через канал релейного выхода 7.

В состав технических средств входят специализированная стойка сигнализации (СС) 10, предназначенная для автоматического определения состояния объекта и систем управления, а также для оперативного обнаружения и сигнализации о неисправностях в информационной и управляющей подсистемах.

Управление композиционным составом смеси ведется с учетом содержания абсолютно сухого вещества, и поэтому повышенные требования предъявляются к точности измерения концентра-

ции компонентов бумажной массы. Определение концентрации этих компонентов бумажной массы и готовой композиции осуществляется с помощью адаптивной математической модели, коэффициенты которой автоматически подстраиваются по данным лабораторных анализов. Управляет этим процессом система иерархическая, двухуровневая, реализуемая как прямое цифровое управление. Она включает в себя взаимосвязанные подсистемы стабилизации содержания целлюлозы в композиции бумажной массы, количества оборотного брака в композиции и уровня в машинном бассейне, прямое цифровое управление расходами компонентов.

Концентрация компонентов бумажной массы стабилизируется с использованием обычных аналоговых систем регулирования. Контуры цифрового управления расходов всех компонентов строятся однотипно. Величина управляющего воздействия, поступающего непосредственно на исполнительный механизм, рассчитывается исходя из отклонений текущего значения расхода от заданного. Заданные значения расходов определяются вычислительной машиной по математической модели.

Система управления плотностью и влажностью бумаги построена по многоуровневому принципу. На нижнем уровне решаются задачи управления сканированием датчики по ширине полотна для определения профиля плотности и влажности, взаимосвязанного управления этими показателями по длине полотна.

Подсистема управления плотностью бумажного полотна является системой прямого цифрового управления с воздействием непосредственно на клапан расхода массы.

В алгоритмах управления предусматривается компенсация основных возмущений по прямой и обратной связи. Подсистема управления влажностью бумажного полотна строится как двухконтурная: внутренний контур включает в себя аналоговый регулятор давления пара в основной сушильной группе, внешний цифровой контур изменяет задание этому регулятору в зависимости от отклонения влажности на накате. Для улучшения качества управления предусмотрена разводка указанных систем.

Система управления фирмы Махурекс (США) [13, 32] предназначена для автоматизированного управления производством бумаги на БДМ. Система предусматривает автоматическую стабилизацию плотности и влажности бумаги и оптимальный выбор задания

этих параметров. Система обеспечивает автоматическое регулирование следующих параметров напорного ящика: суммарного напора, отношения скорости суспензии к скорости сетки. Система "Межурекс" управляет также скоростью бумагоделательной машины.

Основные измеряемые параметры системы "Межурекс": расход и концентрация суспензии, положение губы напорного ящика, давление воздушной подушки, скорость сетки, масса  $1 \text{ м}^2$  бумаги в прессовой части и перед накатом, влажность бумаги перед накатом, давление пара в основной сушильной группе, толщина бумаги.

Управляющие воздействия системы: расход суспензии перед смесительным насосом, расход пара, расход суспензии из напорного ящика на сетку, скорость сетки, расход суспензии после смесительного насоса, расход воздуха в напорный ящик.

Система "Межуреко" состоит из двух пультов управления, один из которых расположен на уровне прессовой части БДМ, а другой - у наката. Пульты оборудованы встроенными кондиционерами. В пульте, расположенном у наката, размещены две мини-ЭВМ (одна резервная). Рядом с этим пультом установлены два устройства печати (одно резервное). Каждый из пультов оборудован дисплеем, на экран которого могут быть выведены параметры процесса, профили массы  $1 \text{ м}^2$ , влажности, сухой массы бумажного полотна. На обоих пультах размещены самопишущие приборы, на которых можно в различных режимах записывать параметры, характеризующие работу системы и технологический процесс. Над пультом мокрой части установлено световое табло, на которое выводятся отклонения параметров за допустимые пределы, состояние системы и состояние процесса.

Непосредственно на БДМ установлены два сканирующих устройства, одно между каландром и накатом, другое между сушильной и прессовой частями. На сканирующих устройствах расположены измерительные головки для измерения массы  $1 \text{ м}^2$ , влажности, толщины бумажного полотна, а также температуры воздушного вавора.

Применение системы "Межуреко" позволяет увеличить производительность бумагоделательных машин на 10 - 12%. Коэффи-

циент использования и надежность системы высокие, наиболее слабым местом являются устройства печати.

4.7.5. АСУТП очистки сточных вод рассмотрим на примере Байкальского целлюлозного завода [37]. Очистные сооружения состоят из двух потоков биологической очистки, реагентной химической обработки, механической очистки на песчаных фильтрах и доочистки в прудах, отстойнике и аэраторе. АСУТП решает следующие задачи: централизованный контроль, стабилизация технологического режима биологической очистки, управление процессом химической очистки.

Система централизованного контроля охватывает около 400 автоматически измеряемых параметров и около 200 данных лабораторных анализов. Автоматически измеряются расходы воды, ила, осадка, воздуха, реагентов; концентрации органических загрязнений, ила, взвешенных веществ, кислорода, реагентов; рН, рВ, рNa; щелочность, электропроводность, окислительно-восстановительный потенциал; уровни жидкости в емкостях, осадка и ила в отстойниках.

Для сбора, обработки и хранения информации, а также для решения задач управления используется управляющий вычислительный комплекс М-6000, состоящий из процессора, телетайпа, двух видеотерминалов, трех устройств печати, устройств ввода с перфоленты и вывода на нее, устройств связи с объектом. Емкость оперативной памяти составляет 32 тысячи 16-разрядных слов, емкость накопителя на магнитных дисках - 500000 слов.

Опрос автоматических датчиков производится один раз в пять минут, программа централизованного контроля обеспечивает оператора информацией о выходе параметров за вероятные, допустимые и аварийные пределы, осуществляет расчет технологических и технико-экономических показателей и печать рапортов.

АСУТП включает пять систем автоматического управления: две системы компенсации возмущений, действующих на входе процесса биологической очистки, с использованием аварийного накопителя (по одной системе на каждый поток), две системы управления расходами биогенных солей и систему дозирования коагулянта и серной кислоты по щелочности сточной воды в процессе химической очистки.

В АСУТП используется как прямое цифровое управление, так и управление заданиями регуляторам локальных систем.

4.7.6. Автоматизированные системы контроля загрязнения воды и воздуха. Автоматические станции контроля состава поверхностных вод позволяют координировать действия предприятий, выпускающих в водоемы сточные воды. Измерительная часть автоматической станции типа АСКЗВ предназначена для непрерывного или циклического контроля химического состава поверхностных вод. Она может быть использована для контроля качества поверхностных вод на предприятиях питьевого водоснабжения и в организациях, использующих поверхностные воды в качестве технологического сырья.

Измерительная часть обеспечивает измерение 19 показателей. Кроме измерителей pH, ОВП, температуры, концентрации кислорода, электропроводности, уровня мутности дополнительно вводятся первичные преобразователи, предназначенные для обнаружения загрязняющих веществ с помощью ионоселективных электродов с устройствами физико-химической подготовки проб, первичные преобразователи для определения загрязняющих веществ с помощью автоматических фотоколориметров, нормирующие преобразователи с коммутатором каналов и развязывающим усилителем измеряемых ингредиентов. Сюда входит также пробоотборное устройство, рассчитанное на размещение 24 проб с их термостатированием.

В автоматизированной системе осуществляется запись измеряемых параметров на приборах и передача информации на центральный диспетчерский пункт. Поступающая сюда информация от нескольких станций, контролирующих отдельные участки водоема, регистрируется и обрабатывается на ЭВМ, что позволяет принимать меры в случае сброса неочищенных сточных вод.

В нашей стране все большее внимание уделяется развитию средств контроля и охраны окружающей среды, в том числе водного бассейна городов и крупных промышленных центров. Работы по созданию и промышленному освоению серийного производства комплексов приборов, предназначенных для анализа атмосферных загрязнений, проводятся в СССР с конца 60-х годов. Промышленностью освоен и серийно выпускается ряд специализированных комплексов приборов и оборудования (комплексных ла-



бораторий), предназначенных для исследования и контроля атмосферных загрязнений (ИАЗ-1, ЛИВ-1, ПОСТ-1, "Атмосфера-II"). Новыми разработками являются автоматизированная станция контроля атмосферных загрязнений "Воздух-1" и автоматическая станция контроля атмосферных загрязнений АСКЗА, являющаяся частью общесоюзной автоматизированной системы наблюдения и контроля окружающей среды АНКОС.

Станция АСКЗА предназначена для использования в составе головных автоматизированных систем контроля и наблюдения за состоянием атмосферы АНКОС, а также в качестве автономного устройства, обеспечивающего измерение, обработку, регистрацию и хранение точной и своевременной информации о содержании загрязнений в атмосфере.

Главными задачами, решаемыми станцией, являются: непрерывное измерение содержания вредных примесей окиси, двуокиси и окислов азота, углеводородов, окиси углерода, сернистого газа и озона в атмосферном воздухе; непрерывное измерение скорости и направления ветра, температуры воздуха и температуры точки росы; автоматический сбор сигналов, поступающих от первичных преобразователей, линеаризация, масштабирование, усреднение и представление информации о физических величинах по каждому измерительному каналу; регистрация поступающей информации на машинном носителе или передача на центральный диспетчерский пульт для дальнейшей обработки на ЭВМ; обеспечение автономной работы технических средств в течение 15 суток; обеспечение функционирования технических средств в интервале температур от  $-50$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности до 95%.

Станция представляет собой павильон прямоугольной формы, облицованный снаружи алюминиевым профилем.

В качестве первичных датчиков для измерения загрязнений атмосферы используются пять газоанализаторов, входящих в газоизмерительную систему, обеспечивающую их автоматическое обнуление и коррекцию шкал. Все газоанализаторы имеют аналоговый выход электрического сигнала с уровнем 0-5 мА и 0-10 В.

В комплект метеодатчиков входят датчики направления и скорости ветра, а также датчики температуры воздуха и температуры точки росы, имеющие выход в виде сопротивления 400-

600 Ом. Датчик направления и скорости ветра имеет выходной сигнал в виде последовательности импульсов с определенной частотой.

Устройство сбора и обработки информации обеспечивает автоматический прием сигналов, поступающих от первичных датчиков, линейаризацию, масштабирование, усреднение и представление информации о физических величинах, выдачу логических сигналов для управления режимами работ первичных датчиков, вывод информации на алфавитно-цифровое печатное устройство (режим наладки), на перфоратор или в аппаратуру передачи данных.

Охранно-пожарная сигнализация, установленная на станции, состоит из датчиков охранной сигнализации, пожарных извещателей, реагирующих на температуру и дым, и приемно-контрольного устройства, которое передает преобразованные сигналы датчиков по телефонным каналам на диспетчерский пульт городской пожарно-охранной службы, а также вырабатывает сигнал на запуск автоматической системы пожаротушения. Система автоматического пожаротушения состоит из двухбатарейной батареи, электрического и механического пусковых устройств и подводящих трубопроводов. Применение охранно-пожарной сигнализации и системы автоматического пожаротушения делают станцию безаварийной и безопасной при эксплуатации ее в городах и промышленных центрах.

Использование станций АСКЗА в системе АНКОС или в качестве автономных контрольно-записывающих устройств позволяет оперативно и систематически осуществлять слежение за состоянием воздушного бассейна городов, выявлять основные объекты, загрязняющие атмосферу, и обеспечивать поддержание воздушного бассейна в состоянии, гарантирующем безопасность и здоровье населения.

4.7.7. Экономическая эффективность автоматизации технологических процессов [29]. Экономическая эффективность АСУ определяется годовым приростом прибыли (годовой экономии)  $\Pi^A$  в связи с функционированием ее, годовым экономическим эффектом  $\mathcal{E}$  и эффективностью затрат на ее создание  $E_p$  (или сроком окупаемости  $T$ ).

Годовой прирост прибыли (годовая экономия) рассчитывается по формуле

$$\Pi^A = \frac{(A_2 - A_1)}{A_1} \cdot \Pi_1 + \frac{(C_1 - C_2)}{100} \cdot A_2 + \Delta \Pi^A, \quad (4.1)$$

где  $A_1$ ,  $A_2$  - годовой объем реализуемой продукции до и после внедрения АСУ, тыс.руб.;  $C_1$ ,  $C_2$  - затраты на 1 рубль реализуемой продукции до и после внедрения АСУ, коп.;  $\Pi_1$  - годовая прибыль от реализации продукции до внедрения АСУ, тыс.руб.;  $\frac{(A_2 - A_1)}{A_1} \cdot \Pi_1$  - годовой прирост прибыли за счет роста объема реализуемой продукции и повышения ее качества, т.н. руб.;  $\frac{(C_1 - C_2)}{100} \cdot A_2$  - годовой прирост прибыли за счет

снижения издержек производства, тыс.руб.,  $\Delta \Pi^A$  - прибыль, получаемая предприятием от ликвидации или сокращения штрафов, пеней, неустоек или других непроизводительных потерь, не учитываемых в себестоимости продукции, не связанных с хозяйственной деятельностью предприятия и зависящих от функционирования АСУ и от других факторов, не входящих в предыдущие члены, тыс.руб.

В том случае, когда повышение качества продукции за счет внедрения АСУ не находит отражения в надбавках к действующим ценам, дополнительная прибыль ( $\Delta \Pi^A$ ), образующаяся у потребителей продукции повышенного качества, при условии ее подтверждения в установленном порядке предприятиями и организациями министерств-потребителей, прибавляется к сумме прибыли, получаемой за счет внедрения АСУ.

В случае выявления годового экономического эффекта от автоматизации технологического процесса или отдельного потока (производства) на действующем предприятии, когда АСУ оказывает влияние на выпуск одного из видов продукции в одном переделе и нет планирования себестоимости продукции по элементам затрат, но возможен прямой учет изменения себестоимости, целесообразно пользоваться для подсчета годовой экономии формулами (4.2) и (4.3).

При повышении качества и снижении себестоимости продукции без изменения ее вида:

$$\Pi^A = [c_1 - c_2 + (\Pi_2 - \Pi_1)] \cdot B_2, \quad (4.2)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  - себестоимость единицы продукции до и после внедрения АСУ, руб.;  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  - средняя оптовая цена продукции до и после внедрения АСУ, руб.;  $B_2$  - годовой выпуск продукции в натуральном выражении после внедрения АСУ.

При изменении вида продукции:

$$\Pi^A = (\Pi_H - c_H) \cdot B_H - (\Pi_0 - c_0) \cdot B_0, \quad (4.3)$$

где  $\Pi_H$  и  $\Pi_0$  - средние оптовые цены нового вида продукции (после внедрения АСУ) и выпускавшегося ранее (до внедрения АСУ), руб. за единицу;  $c_H$  и  $c_0$  - себестоимость нового вида продукции после внедрения АСУ и ранее выпускавшегося до внедрения АСУ, руб. за единицу;  $B_H$  и  $B_0$  - годовой выпуск нового и старого вида продукции в натуральных единицах.

Годовой экономический эффект определяется по формуле

$$\mathcal{E} = \Pi^A - E_0 \cdot K_{\text{доп}}^A, \quad (4.4)$$

где  $E_0$  - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, равный 0,16;  $K_{\text{доп}}^A$  - дополнительные капитальные вложения, рассчитанные на основе удельных капитальных вложений с учетом изменения объемов производства и фактора времени, тыс.руб.

Эффективность затрат определяется показателями

$$E_p = \frac{\Pi^A}{K_K^A} \geq E_0 \text{ вт}; \quad T = \frac{K_K^A}{\Pi^A}, \quad (4.5)$$

где  $E_p$  - расчетный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений на создание АСУ;  $K_K^A$  - капитальные вложения на создание АСУ (при расчете фактической экономической эффективности капитальных вложений принимаются равными приросту основных фондов, связанных с созданием АСУ по статье "Вычислительная техника" годового отчета "О наличии и движе-

нии основных средств (фондов) и амортизационного фонда", а при проектировании - по сметно-финансовому расчету), тно.руб.  
 $E_{0\text{ BT}}^A$  - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений на создание АСУ, утвержденный Госпланом СССР на 1981-1990 гг.; для целлюлозно-бумажной промышленности он равен 0,4. Для отдельных АСУ допускается также использование нормативных коэффициентов для АСУТП и АСОДУ (0,5) и для соответственно АСУП (без АСУТП и АСОДУ) (0,31 - только в отдельных случаях, при значительных капитальных вложениях и их недостаточной отдаче);  $T$  - срок окупаемости капитальных вложений, лет.

Расчетный коэффициент эффективности ( $E_p$ ) сопоставляется с нормативным значением ( $E_{0\text{ BT}}^A$ ), и в случае, когда расчетный коэффициент равен нормативному или превышает его, АСУ считается эффективной.

Если АСУ обеспечивает решение социальных и других важных задач, то коэффициент эффективности капитальных вложений допускается ниже нормативного по согласованию с Госпланом СССР. При этом в целом по министерству или ведомству по мероприятиям, связанным с внедрением АСУ, нормативный коэффициент должен соответствовать утвержденному.

## Приложение 1

Приборы и системы агрегатного комплекса электрической системы регулирования (АКЭСР)

В соответствии с функциональным назначением устройства АКЭСР делится на следующие группы: устройства ввода-вывода информации; функциональные устройства; регулирующие устройства; устройства оперативного управления; усилители мощности; блок питания групповой БП-III; сервисные устройства [6].

Устройства ввода-вывода информации. Блок кондуктивного разделения и суммирования БКР1 предназначен для гальванического разделения, алгебраического суммирования, демпфирования и дифференцирования унифицированных сигналов постоянного тока.

Входные сигналы при входном сопротивлении не более 250 Ом 0-5 мА; не более 100 Ом 0-20 и 4-20 мА; не менее 10 кОм от 0 до  $\pm 10$  В. Выходные сигналы при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм 0  $\pm 10$  В; не менее 2,5 кОм 0-5 мА; не менее 1 кОм 0-20 и 4-20 мА. Потребность преобразования сигнала  $\pm 0,5\%$ . Постоянная времени демпфирования 0-24 с.

Блок кондуктивного разделения двухканальный БКР2 предназначен для гальванического разделения входных и выходных электрических цепей по двум независимым каналам - демпфирования или дифференцирования. Входные сигналы при входном сопротивлении не более 250 Ом 0-5 мА; не более 100 Ом 0-20, 4-20 мА; не менее 10 кОм 10 В. Выходные сигналы при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм 0-10 и -10...+10 В. Основная потребность преобразований по выходам  $\pm 0,5\%$ . Коэффициенты усиления 1; 0,5-24. Постоянная времени демпфирования 0-24 с.

Блок кондуктивного разделения с двухпредельной сигнализацией типа БКР3 предназначен для гальванического разделения

входных и выходных электрических цепей, демпфирования или дифференцирования и двухпредельной сигнализации о независимой установкой порогов срабатывания.

Входные сигналы при входном сопротивлении не более 250 Ом 0–5 мА; не более 100 Ом 0–20,4–20 мА; не менее 10 кОм 0–10, –10...+10 В. Выходные сигналы при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм 0–10, –10...+10 В. Основная погрешность преобразования по выходам  $\pm 0,5\%$ . Коэффициенты: масштабирования 0–1; усиления 1; 0,5–24. Постоянная времени демпфирования 0–24 с.

Функциональные устройства. Блок вычислительных операций БВО предназначен для выполнения операций перемножения, деления, возведения в квадрат, извлечения квадратного корня, алгебраического суммирования аналоговых сигналов.

Входные сигналы при входном сопротивлении не менее 10 кОм 0–10, –10...+10 В. Выходные сигналы при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм 0–10, –10...+10 В. Основная погрешность при выполнении операций: перемножения и возведения в квадрат  $\pm 0,5\%$ ; деления и извлечения корня  $\pm 2,5\%$  при входных сигналах 0,5–1В и 0,5% при входных сигналах 1–10В. Диапазон плавной установки коэффициентов: масштабирования 0–1; усиления 0,5–10.

Блок селектирования БСЛ предназначен для выделения наибольшего (наименьшего) сигнала из четырех (трех) линейных комбинаций входных сигналов, а также для кусочно-линейного воспроизведения простейших нелинейных зависимостей.

Входные сигналы при входном сопротивлении не менее 10 кОм 0... $\pm 10$ В. Выходные сигналы при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм 0–10, 0... $\pm 10$ В. Основная погрешность селектирования  $\pm 0,5\%$ . Диапазон плавной установки коэффициента: масштабирования 0–1; усиления 0,5–10.

Блок сравнения БСЛ–04 предназначен для выделения наибольшего или наименьшего из четырех кондуктивно-разделенных друг от друга сигналов.

Входной сигнал при входном сопротивлении не более 0,25 кОм 0–5 мА. Выходной сигнал при сопротивлении нагрузки не более 2,5 кОм 0–5 мА. Основная погрешность  $\pm 0,5\%$ . Коэффи-

коэффициенты масштабирования 0-1. Постоянная времени демпфирования 0-24 с.

Блок нелинейных преобразований БНП предназначен для получения нелинейной зависимости выходного сигнала от входного и линейной комбинации входных сигналов в системах автоматического регулирования и контроля.

Входные сигналы при входном сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм  $0 \pm 10В$ . Коэффициенты: масштабирования 0-1; усиления 0,5; 1,5; Точность установки значений функции  $\pm 1\%$ . Начальное значение выходного сигнала 1-100%. Размер каждого участка аппроксимации 2-30%.

Блок нелинейных преобразований БНП-04 предназначен для кусочно-линейного воспроизведения нелинейных функциональных зависимостей.

Входные сигналы при входном сопротивлении не более 0,25 кОм 0-5 мА; не более 0,1 кОм 0-20 мА; не менее 10 кОм 0-10В. Выходные сигналы при сопротивлении нагрузки не более 2,5 кОм 0-5 мА; не более 1 кОм 0-20 мА; не менее 2 кОм 0-10В. Точность установки значений  $\pm 1\%$ . Начальное значение выходного сигнала 1-100%. Размер каждого участка аппроксимации 2-30%. Коэффициент усиления на участке  $\pm 10$ . Постоянная времени демпфирования 0-24 с.

Блок сигнализации БСГ предназначен для двухпредельной сигнализации по двум независимым каналам о достижении линейными комбинациями входных сигналов двух независимых уставок или двухпозиционного (трехпозиционного) регулирования. Входной сигнал при входном сопротивлении не менее 10 кОм  $0 \dots \pm 10В$ . Выходной сигнал при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм  $0 \dots \pm 10В$ .

Блок прецизионного интегрирования БПИ предназначен для реверсивного интегрирования аналогового или широтно-модулированного импульсного сигнала с возможностью ограничения выходного сигнала, а также двухпредельной сигнализации.

Входные сигналы при входном сопротивлении не менее 10 кОм 0-10,  $0 \dots \pm 10В$ . Выходные сигналы БПИ-1, БПИ-21 при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм 0-10В; при сопротивлении нагрузки порядка 2,5 кОм 0-5 мА; при сопротивлении на-



нагрузки не более 1 кОм 0–20 мА. Выходной сигнал БПИ-III при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм 0–10В. Дискретность измерения выходного сигнала 0,1%. Коэффициент масштабирования 0–1. Постоянная времени интегрирования 5–10 000 с. Погрешность интегрирования  $\pm 1,5\%$ .

Блок динамических преобразований БДП предназначен для интегрирования, демпфирования или дифференцирования линейной комбинации входных сигналов с логическим управлением, двухпредельными сигнализацией и ограничением в системах автоматического контроля и регулирования.

Входные сигналы аналоговые при входном сопротивлении не менее 10 кОм 0–10, 0... $\pm 10$ В. Входные сигналы логические: "Логический 0" – вход разомкнут; "Логическая 1" – вход замкнут на общую шину. Выходные сигналы аналоговые при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм 0–10, 0... $\pm 10$ В. Выходные сигналы логические: "Логический 0" – контакт разомкнут; "Логическая 1" – контакт замкнут. Номинальные значения постоянной времени интегрирования 5–10 000 с. Погрешность установки постоянной времени интегрирования  $\pm 1,5\%$ . Диапазон установки коэффициентов: масштабирования 0–1; усиления 0,5–1.

**Регулирующие устройства.** Блок регулирующей импульсной РБИ предназначен для формирования пропорционального (П), пропорционально-интегрального (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) законов регулирования в автоматических регуляторах, содержащих интегрирующие исполнительные устройства постоянной скорости.

Входные сигналы при входном сопротивлении не более 0,5 кОм 0–5 мА; не более 0,125 кОм 0–20, 4–20 мА; не более 10 кОм 0... $\pm 10$ В. Выходные сигналы при сопротивлении нагрузки не менее 2–10 кОм 0–10В. Зона нечувствительности 0,2–2%. Скорость связи 0,2–2,5%/с. Постоянные времена: интегрирования 5–500, 20–2000с; демпфирования 0–20 с; дифференцирования 0–230с. Длительность импульса 0,1–1с.

Блок регулирующей импульсной с дискретной автоподстройкой РБИ2 предназначен для формирования ПИ-закона регулирования в автоматических регуляторах, содержащих интегрирующие исполнительные устройства постоянной скорости, с возможностью

дискретного изменения параметров динамической настройки по внешним командным сигналам.

Входные сигналы при входном сопротивлении не более 0,5 кОм 0-5 мА; не более 0,125 кОм 0-20, 4-20 мА; не менее 10 кОм 0-10В, 0...±10В. Выходные сигналы при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм 0...±10В (24 В только для РБИ2-П). Коэффициент масштабирования 0-1. Зона нечувствительности 0,2-2%. Постоянные времени демпфирования 0-20с. Постоянная времени интегрирования 5-500, 20-2000с. Скорость связи 0,2-2,5%/с.

Блок регулирующий с аналоговой автоподстройкой РБИ3 предназначен для формирования ПИ-закона регулирования в автоматических регуляторах, содержащих интегрирующие устройства постоянной скорости, с возможностью аналогового автоматического изменения параметров динамической настройки по внешним управляющим сигналам.

Входные сигналы при входном сопротивлении не более 0,5 кОм 0-5 мА; не более 0,125 кОм 0-20, 4-20 мА; не менее 10 кОм 0...±10В. Выходные сигналы при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм 0...±10, 24В. Коэффициенты масштабирования 0-1. Зона нечувствительности 0,2-2%. Постоянные времена: демпфирования 0-20 с; интегрирования 5-500, 20-2000 с. Скорость связи 0,2-2,5%/с. Диапазон аналоговой подстройки скорости связи не менее 1,5%/с.

Регулирующие устройства РБИМ предназначены для формирования П-, ПИ-, ПИД-законов регулирования автоматических регуляторов, содержащих электрические исполнительные механизмы постоянной скорости. Относятся к восстанавливаемым, многофункциональным изделиям. Зависимость суммарной длительности выходных импульсов блока от входных сигналов определяется уравнением

$$Y(t) = \alpha_n \left( \varepsilon_0(t) + \frac{1}{T_n} \int_0^t \varepsilon_0(t) dt + T_{\text{диф}} \frac{d\varepsilon_0(t)}{dt} \right), \quad (\text{П.1})$$

где  $\varepsilon_0(t)$  - демпфированный сигнал рассогласования, определяемый из уравнения

$$T_0 \frac{d\epsilon_0(t)}{dt} + \epsilon_0(t) = \Sigma x(t), \quad (\Pi.2)$$

здесь  $\Sigma x(t)$  - алгебраическая сумма входных сигналов, %;  
 $T_0$  - постоянная времени демпфирования, с;  $\gamma(t)$  - суммарная  
 длительность выходных импульсов регулирующего блока, с;  $\alpha_n$  -  
 коэффициент передачи, с/%.

Коэффициент пропорциональности регулятора, состоящего из  
 блока и исполнительного механизма постоянной скорости, опре-  
 деляется по формуле

$$K_p = \frac{\alpha_n}{T_m} \cdot 100.$$

где  $K_p$  - коэффициент пропорциональности регулятора;  $T_m$  -  
 время полного поворота исполнительного механизма, с.

Регулирующие импульсные блоки РЕИМ-II и РЕИМ-III предна-  
 значены для формирования совместно с электрическими исполни-  
 тельными механизмами постоянной скорости II-, III-, ПИД-законов  
 регулирования.

Блоки РЕИМ2М-II, РЕИМ2М-III, РЕИ4М РЕИ6И-III обеспечивают  
 дистанционную дискретную трехступенчатую подстройку коэффици-  
 ента передачи в пределах от 0,5 до 5 с/% и постоянной времени  
 интегрирования от 5 до 500 с.

Блоки РЕИ3М-II, РЕИ4М-III, РЕИ5М-III обеспечивают дистанцион-  
 ное десятикратное плавное увеличение установленных значений  
 коэффициента передачи и постоянной времени интегрирования в  
 диапазонах 0,5-5 с/% и 5-500 с соответственно.

Диапазон плавной установки времени дифференцирования от  
 0 до 230 с.

Блок регулирующей аналоговый РБА предназначен для форми-  
 рования сигнала рассогласования и динамического преобразова-  
 ния его в соответствии с II-, III-, и ПИД-законами регулирова-  
 ния, с ограничением выходного сигнала по верхнему и нижнему  
 уровням.

Блок РБА обеспечивает плавную установку коэффициента про-  
 порциональности в пределах 0,3-50, дискретную установку вре-  
 мени интегрирования в пределах 5-500 с, 20-2000 с, плавную ус-

тановку времени дифференцирования в пределах 0-200 с, 0-400с, планную установку времени демпфирования в двух диапазонах 0-10 с, 0-20 с.

Устройства оперативного управления. Блоки ручного управления типа БРУ-1К, БРУ-2К, БРУ-3К предназначены: БРУ-1К - для ручного или дистанционного переключения цепей управления; БРУ-2К - для ручного или дистанционного управления исполнительными устройствами, кнопочного управления интегрированными исполнительными устройствами; БРУ-3К - для ручного или дистанционного переключения с автоматического режима управления исполнительными устройствами на дистанционный и обратно и для кнопочного управления интегрированными исполнительными устройствами.

Блок ручного управления со встроенным указателем БРУ-У предназначен для ручного кнопочного трехпозиционного управления исполнительными устройствами или выходным сигналами регулирующих блоков, для переключения (ручного или дистанционного) цепей управления на два положения со световой индикацией одного из них, а также с аналоговой индикацией величины сигнала постоянного тока 0-5 мА.

Ручной задатчик для регулирующих блоков РЗД предназначен для ручной установки задания регулируемыми и аналоговыми исполнительными устройствами.

Входной сигнал при входном сопротивлении не менее 40 кОм 0-10 В. Выходные сигналы при сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм 0-10 В; не более 2,5 кОм 0-5 мА; не более 1 кОм 0-20, 4-20 мА. Диапазон установки задания 0-100%. Точность установки задания  $\pm 0,5\%$ . Точность отсчета по шкале задатчика  $\pm 2,5\%$ .

Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-2-3 предназначен для управления электрическими исполнительными механизмами постоянной скорости. Обеспечивает работу регулирующих приборов типов РЕМ, РИМБ, Р 21, Р 12.

Напряжение тока управления 24 В. Максимальный коммутируемый ток (при напряжении 220 В) 4 А. Напряжение тока питания 220 В  $\pm 10\%$ , частота 50  $\pm 1$  Гц.

Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-3А предназначен для управления исполнительными механизмами типа МЭО-К с

трехфазными электродвигателями АОЛ и 4А. Обеспечивает защиту двигателей исполнительных механизмов при работе их "на упор". Исполнение обыкновенное, экспортное, тропическое.

Напряжение тока управления 24 В. Максимальный коммутируемый ток (при напряжении 380 В) 2 А. Напряжение тока питания 380 В, частота 50±1 Гц.

Блок питания групповой ИП-III предназначен для питания блоков АКЭСР в шкафом исполнении и формирования выходных напряжений постоянного и переменного тока.

Выходное напряжение: постоянное 10 В ± 2% и переменное 24 В ± 10%. Напряжение тока питания 380/220 В ± 10%, частота 50 ± 1 Гц; потребляемая мощность не менее 100 В·А. Вероятность безотказной работы в течение 2000 ч составляет 0,97. Габаритные размеры 160х100х180 мм. Масса не более 4 кг.

Сервисные устройства. Испытатель блоков переносный ИПБ предназначен для оперативной проверки технического состояния функциональных, регулирующих блоков и блоков оперативного управления комплекса АКЭСР.

## Приложение 2

### Приборы системы СУПС

В ГСП входит комплекс технических средств для локальных информационно-управляющих систем (КТС ЛМУС). В составе КТС ЛМУС особое место занимает комплекс аналоговых технических средств управления с переменной структурой (СУПС), обладающих высокими динамическими свойствами, точностными характеристиками и помехоустойчивостью. СУПС имеет широкие функциональные, алгоритмические и технические возможности. Благодаря таким свойствам на основе СУПС могут комбинироваться различные по сложности системы — от локальных автономных АСР до многоуровневых САП с применением вычислительной техники, включая микроэлектронные управляющие ЭВМ. САП, построенные на базе СУПС, обеспечивают высокое качество регулирования при изменении динамических свойств объекта управления и наличии нестационарных возмущающих воздействий. Это достигается за счет применения адаптивных регулирующих устройств, адап-

тивных фильтров и помехозащищенных дифференциаторов, а также возможности совместной работы с УВК.

В состав СУПС входят более 30 субблоков, компоновочные шкафы и блоки питания, позволяющие создавать проектно-компоновочные комплексы КМ 2201. Субблоки и блоки, входящие в состав СУПС, приведены ниже [6].

#### Состав СУПС

Наименование	Шифр	Выполняемые функции
Преобразователь сигнала низкого уровня в аналоговый сигнал	05175 (ШНА1)	Преобразование сигналов низкого уровня в аналоговый сигнал с гальваническим разделением входной и выходной цепи
Задачник аналогового сигнала	05183 (ПЗРА1)	Ручная установка задания регулируемой величины или соотношения между регулируемыми величинами. Выбор режимов работы регуляторов
Прибор представления информации	05240 (ПВСИ1)	Индикация в цифровой форме (в процентах) значений измеряемых величин (4 канала)
	05171 (БМАГ1)	Преобразование постоянного тока в напряжение постоянного тока с гальваническим разделением цепей
	05172 (БМАГ2)	Преобразование напряжения постоянного тока в постоянный ток с гальваническим разделением цепей
Субблоки гальванического разделения цепей	05213 (БМАГ3)	Преобразование постоянного тока в напряжение постоянного тока с гальваническим разделением цепей
	05214 (БМАГ4)	Преобразование напряжения постоянного тока в постоянный ток с гальваническим разделением цепей

Наименование	Шифр	Выполняемые функции
Субблок преобразования частотного сигнала в напряжение постоянного тока	05176 (БПСН1)	Преобразование непрерывного частотного сигнала в напряжение постоянного тока (2 канала)
Субблоки преобразования постоянного тока в частотный сигнал	05180 (БПНС3) 05205 (БПНС4)	Преобразование напряжения постоянного тока в непрерывный частотный сигнал (4 канала)
Субблок преобразования переменного напряжения в постоянное	05193 (БПФН1)	Преобразование напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока
Субблок математический	05178 (БМАУ1)	Выполнение одной из операций: умножения, деления, возведения в квадрат, извлечение квадратного корня
Субблок алгебраического суммирования	05173 (БМАО1)	Алгебраическое суммирование трех сигналов, два из которых с независимым масштабированием (2 канала)
Субблок интегрирующий	05192 (БМАИ1)	Интегрирование с возможностью установки в режим "сброс", "интегрирование", "вспоминание"
Субблок дифференцирующий помехозащищенный	05170 (БМАД1)	Дифференцирование, в том числе при наличии помех во входном сигнале
Субблок формирования функций	05189 (БМАИ1)	Линеаризация или воспроизведение функциональных зависимостей
Субблок фильтрующий	05197 (БМА-И)	Фильтрация помех
Субблок вспомогательных функций	05206	Выполнение операций: масштабирования, суммирования, определения модуля, инвертирования, повторения, двустороннего ограничения, преобразования, выдачи напряжения корректировки нуля и опорного напряжения, коммутации аналоговых сигналов

Наименование	Шифр	Выполняемые функции
Субблок регулирующий с аналоговым выходом	Ф5179(БРАА1)	Выработка регулирующего воздействия, изменяющегося по ПИ- и ПИ-закону и представленного непрерывным выходным сигналом
Субблок регулирующий с импульсным выходом	Ф5177(БРАИ1)	Выработка регулирующего воздействия, изменяющегося по ПИ-закону и представленного импульсным выходным сигналом
Субблок сравнения сигналов направления постоянного тока	Ф5174(БМА02)	Выработка двух- и трехпозиционных регулирующих воздействий, сигнализация отклонений от уставок
Субблок регулирующий экстремальный	Ф5188(БРАУ1)	Выработка нелинейного регулирующего воздействия для управления объектами, имеющими экстремальную характеристику
Субблок адаптивный с переменной структурой	Ф5210(БМАР2)	Выработка нелинейного регулирующего воздействия в виде непрерывного выходного сигнала для управления объектами с запаздыванием, с адаптацией к изменяющемуся времени запаздывания
Субблок регулирующий с переменной структурой с аналоговым выходом	Ф5187(БРАА2)	
Субблок управления аналоговый	Ф5182(БУРН1)	Местная установка задания, ввод задания, установленного дистанционно, в том числе от УВК, переключение и сигнализация режимов работы регулятора с непрерывным выходным сигналом
Субблок управления импульсный	Ф5191(БУРР4)	Местная установка задания, ввод задания, установленного дистанционно, в том числе от УВК, переключение и сигнализация режимов работы регулятора с импульсным выходным сигналом
Субблоки управления	Ф5190(БВ0У1) Ф5172(БВ0У2)	Гальваническая развязка, нормализация и коммутация сигналов дистанционного управления, в том числе от УВК



Наименование	Наименование	Выполняемые функции
Субблок управления внешними компью- терами	65194(БЗУР1)	Выдача позиционных сигна- лов управления
Блок питания	65195(БП19)	Питание ОУПБ или других устройств электронной техники нестабилизирован- ным напряжением постоян- ного тока

## Указатель литературы

1. А.с. 861439 СССР, МКИ<sup>3</sup> Д21В1/32. Способ автоматического управления непрерывным ропуском сырья в гидроразбивателе / Г.П. Буйлов, А.А. Гаузе, М.П. Милевский; А.Е. Ульянов (СССР). Заявлено 20.12.79; Опубл. 07.09.81. Бюл. №33.
2. А.с. 990915 СССР, МКИ<sup>3</sup> Д21В1/32. Способ автоматического управления непрерывным ропуском сырья в гидроразбивателе / Г.П. Буйлов, В.Г. Пивоваров, А.М. Белоногов, Э.И. Кейран (СССР). Заявлено 28.10.80; Опубл. 23.04.83. Бюл. №3.
3. А.с. 1101486 СССР, МКИ<sup>3</sup> Д21В1/34. Способ автоматического управления сортировкой гидроразбивателем / Г.П. Буйлов, А.А. Гаузе, В.Г. Пивоваров, А.М. Белоногов, Н.А. Коотыченков, Н.Н. Большов (СССР). Заявлено 17.03.83; Опубл. 07.07.84. Бюл. №25.
4. Буйлов Г.П. Автоматическое измерение концентрации и степени помола волокнистой суспензии. М., 1979.
5. Буйлов Г.П. Автоматика, автоматизация производственных процессов и АСУ ТП ЦБП. Л., 1986.
6. Буйлов Г.П., Доронин В.А., Пожитков В.В. Автоматизация тепловых процессов целлюлозно-бумажных производств. М., 1986.
7. Буйлов Г.П., Серебряков Н.П., Власов С.И. Основы автоматизации и автоматизации производственных процессов в ЦБП. Л., 1982.
8. Буйлов Г.П., Серебряков Н.П., Власов С.И. Основы автоматизации производственных процессов целлюлозно-бумажной промышленности. Л., 1983.
9. Буйлов Г.П., Серебряков Н.П., Власов С.И. Автоматика и автоматизация производственных процессов ЦБП. Л., 1985.
10. Буйлов Г.П., Серебряков Н.П., Пожитков В.В. Практические занятия по курсу "Автоматика и автоматизация производственных процессов". Л., 1981.
11. Буйлов Г.П., Хардинов Е.В. Автоматический контроль и управление процессами сушки бумаги, картона и целлюлозы на бумаго-картоноделательных и сушильных машинах. М., 1986.
12. Буйлов Г.П., Яковлев И.И. Основы автоматизации и автоматизации производственных процессов. Л., 1976.
13. Вьюков И.Е. Автоматизация технологических процессов целлюлозно-бумажной промышленности. М., 1983.
14. Галкин В.Ф., Шнайдер Н.В., Зорин И.Ф., Петров В.П. Программируемый контроллер управления процес-

сом периодической варки целлюлозы на базе микроЭВМ "Электроника С5-12" // Автоматизация, механизация и оборудование процессов целлюлозно-бумажного производства: Сб. трудов. ВНИО бумпрома. Л., 1981.

15. Голянт А.И., Альперович Л.С., Васьин В.М. Системы цифрового управления в химической промышленности. М., 1985.

16. ГОСТ 21.404-85. Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. Введ. 01.01.86. - М., 1985.

17. Дахин М.М., Петров В.П., Ольшанский Э.М. Система управления процессом подготовки массы с использованием микропроцессорной техники // Экспресс-информация ВНИИЭИлеспрот. 1981. № 51.

18. Доронин В.А. Автоматическое управление теплоэнергетическими процессами целлюлозно-бумажных производств. Л., 1979.

19. Зайцев И.М. Эксплуатация и ремонт суперкаландров. М., 1981.

20. Зорин И.Ф., Петров В.П., Роговская С.А. Управление процессами целлюлозно-бумажного производства. М., 1981.

21. Калугин В.К. Суперкаландры. Л., 1983.

22. Клименко А.П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли. М., 1978.

23. Кляев А.С., Глазов Б.В., Дубровский А.Х. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справочное пособие / Под ред. А.С. Кляева. Киев, 1980.

24. Кляев А.С., Глазов Б.В., Миндин М.Б. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля. М., 1983.

25. Кокорева Т.А. Автоматизированные системы управления ЦНИ. Л., 1985.

26. Кондрашкова Г.А. Технологические измерения и приборы в целлюлозно-бумажной промышленности. М., 1981.

27. Кошарский Б.Д., Безновская Т.Х., Бек В.А. и др. Автоматические приборы, регуляторы и вычислительные системы: Справочное пособие / Под ред. Б.Д. Кошарского. 3-е изд., перераб. и доп. Л., 1976.

28. Кучумов В.А. АСУ ТП варки целлюлозы "Суперкорд" // Бумажная промышленность. 1985. № 10.

29. Методика определения экономической эффективности автоматизированных систем управления предприятиями и производственными объединениями целлюлозно-бумажной промышленности. Л., 1982.

30. Обозначения условные в схемах автоматизации технологических процессов: ОСТ 36-27-77/ М., 1977.

31. Общеотраслевые руководящие методические материалы по созданию АСУ ТП. М., 1987.

32. Петров В.П., Зорин И.Ф., Родуль-ская С.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. М., 1977.

33. Пожитков В.В. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации в ЦНИ. Л., 1983.

34. Прохоров В.А. Основы автоматизации аналитического контроля химических производств. М., 1984.

35. Райниш К. Кибернетические основы и описание непрерывных систем. М., 1978.

36. Раессохин В.Н., Смеродин В.Н., Соболев О.Ф. и др. Опыт эксплуатации АСУ ТП непрерывной варки целлюлозы на котласоом ЦБК//Автоматизация, механизация и оборудование процессов целлюлозно-бумажного производства: Сб. трудов ВНИОБумпрома. М., 1979.

37. Серебряков Н.П. Автоматизация и автоматизация процессов очистки и рекуперации промышленных выбросов. Л., 1986.

38. Стефани Е.П. Основы построения АСУ ТП. М., 1982.

39. Суриков В.Н., Яковлев В.Б. Проектирование систем автоматизации технологических процессов ЦНИ. Л., 1983.

40. Фесенко Е.П., Петров В.П., Дахин М.М. и др. Производство бумаги с помощью УЕМ//Бумажная промышленность. 1975. № 11.

41. Цешковский Э.В., Преображенский Л.Н., Пиргач Н.С. Справочник по автоматизации целлюлозно-бумажных предприятий/Под ред. Э.В.Цешковского. 2-е изд., доп. М., 1979.

42. Чакки Ф. Современная теория управления. М., 1975.

43. Шапоров О.М., Машинин А.И. Управление дисковыми мельницами при помощи средств цифровой вычислительной техники. М., 1983.

44. Дрезвич Е.И. Теория автоматического управления. Л., 1975.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие .....	3
Г л а в а 1. <u>Автоматические системы управления</u> .....	5
1.1. Основные принципы управления.....	-
1.2. Классификация САУ.....	8
1.3. Характеристика и методика исследования САУ.....	44
1.3.1. Математическое описание элементов автоматических систем управления (14). 1.3.2. Частотные характеристики (18). 1.3.3. Типовые звенья САУ (23). 1.3.4. Соединения звеньев (29). 1.3.5. Устойчивость САУ (32). 1.3.6. Исследование аналоговых САУ (37).	
1.4. Специальные виды САУ.....	
1.4.1. Нелинейные автоматические системы управления (49). 1.4.2. Дискретные автоматические системы управления (52). 1.4.3. Оптимальные автоматические системы управления (55). 1.4.4. Адаптивные автоматические системы управления (57).	
Г л а в а 2. <u>Технические средства автоматических систем управления</u> .....	59
2.1. Основные понятия метрологии.....	-
2.1.1. Единицы измерений (59). 2.1.2. Характеристики автоматических средств измерения (61). 2.1.3. Погрешности измерений (62).	
2.2. Автоматические измерения общетехнических параметров.....	66
2.2.1. Измерение температуры (66). 2.2.2. Измерение давления (70). 2.2.3. Измерение уровня (74). 2.2.4. Измерение расхода (78). 2.2.5. Измерение состава и свойств жидкостей (84). 2.2.6. Измерение состава и свойств газов (88).	

2.3. Автоматические измерения параметров оточных вод.....	99
2.3.1. Измерение содержания растворенного кислорода и органических загрязнений ( 99 ).	
2.3.2. Измерение содержания цианидов и хрома (100). 2.3.3. Измерение содержания активного ила (101). 2.3.4. Измерение свойств осветленной воды (102).	
2.4. Автоматические измерения специальных параметров целлюлозно-бумажной промышленности.....	103
2.4.1. Измерение концентрации волокнистой суспензии (103). 2.4.2. Измерение степени помола волокнистой суспензии (113). 2.4.3. Измерение влажности бумажного и картонного полотна (116). 2.4.4. Измерение масс $1 \text{ м}^2$ бумажного и картонного полотна (121).	
2.5. Автоматические показывающие и регистрирующие приборы.....	124
2.6. Системы автоматических приборов.....	130
2.6.1. Приборы системы "Старт" (130). 2.6.2. Приборы системы "Каскад" (134).	
2.7. Преобразователи сигналов и исполнительные устройства.....	138
<b>Глава 3. Автоматизация технологических процессов.</b>	<b>144</b>
3.1. Основы построения функциональных схем автоматизации технологических процессов.....	-
3.2. Автоматизация основных технологических процессов целлюлозно-бумажного производства.....	147
3.2.1. Автоматизация производства полуфабрикатов (147). 3.2.2. Автоматизация производства бумаги (156). 3.2.3. Автоматизация процессов регенерации химических (169).	
3.3. Автоматизация технологических процессов очистки оточных вод и газовых выбросов.....	176
3.3.1. Автоматизация очистки оточных вод (176). 3.3.2. Автоматизация очистки газовых выбросов (181).	

<b>Глава 4. Автоматизированные системы управления..</b>	<b>186</b>
4.1. Основы построения автоматизированных систем управления.....	-
4.2. Функции автоматизированных систем управления...	188
4.2.1. Назначение и функции АСУП (188). 4.2.2. Назначение и функции АСОДУ (188). 4.2.3. Назначение и функции АСУТИ (190).	
4.3. Режимы использования управляющего вычислительного комплекса в АСУТИ.....	194
4.4. Математическое обеспечение АСУТИ.....	198
4.5. Техническое обеспечение АСУТИ.....	200
4.5.1. Состав технического обеспечения АСУТИ (200). 4.5.2. Управляющие вычислительные комплексы на базе мини-ЭВМ (201). 4.5.3. Управляющие вычислительные комплексы на базе микро-ЭВМ (208).	
4.6. Этапы разработки АСУТИ.....	211
4.7. АСУТИ целлюлозно-бумажного производства.....	213
4.7.1. АСУТИ непрерывной варки целлюлозы (213). 4.7.2. АСУТИ периодической варки целлюлозы (219). 4.7.3. АСУТИ отбелки целлюлозы (222). 4.7.4. АСУТИ производства бумаги (227). 4.7.5. АСУТИ очистки сточных вод (239). 4.7.6. Автоматизированные системы контроля загрязнения воды и воздуха (240). 4.7.7. Экономическая эффективность автоматизации технологических процессов (242).	
Приложение 1.....	246
Приложение 2.....	253
Указатель литературы.....	258

**Учебное издание**

**Буйлов Герман Павлович  
Дорохин Валентин Алексеевич  
Серебряков Николай Павлович**

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ  
ЦЕЛЕННО-ЧУМАННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Редактор И.Н.Разанова  
Обложка художника В.А. Тиликина  
Художественный редактор С.В.Алексеев  
Технический редактор А.В. Боршева  
Корректоры С.К.Школьников, Л.С.Львова**

**ИБ № 2978**

---

**Подписано в печать 12.10.88. М-34800. Формат 60x84 1/16.  
Бумага тип. № 2. Печать офсетная. Усл.печ.л. 15,34.  
Усл. кр.-отт. 15,51. Уч.-изд.л. 14,16. Заказ 4213.  
Тираж 1275 экз. Цена 45 коп.  
Издательство Ленинградского университета, 199034, Ленинград,  
Университетская наб., 7/9**

---